RADIATION EDUCATION

# 放射線教育

付放射線教育フォーラム 2017 年度活動報告

2017

VOL. 21 NO. 1

放射線教育フォーラム

Radiation Education Forum

*放射線教育*
***Radiation Education***

**Vol. 21　No. 1**

## 目　次

【巻頭言】　当フォーラムの誇りと悩み　森 千鶴夫　1

【資料】
放射線を通して現代科学（素粒子、宇宙、量子論、相対論）に親しむ
－新しい放射線教育の提案－　大野新一、大野　玲　3

【資料】
特集 放射線発見物語　吉川秀夫　13
第１回　見えない光を求めて　13
第２回　世紀のＸ線フィーバー　18
第３回　ウランとその放射線の発見　23
第４回　電子をとらえた　28
第５回　α線、β線、そしてγ線　33
第６回　Ｎ線は存在しない　38
第７回　天にも地にも放射線　43
第８回　原子力時代の夜明け前　48
著者略歴　53

【資料】　放射線教育　巻頭言・編集後記執筆者　54

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方　55
編集後記　柴田誠一　59

発行：2018 年 3 月 31 日，NPO 法人放射線教育フォーラム
〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2
萬栄ビル 202 号室
Tel: 03-3843-1070　FAX: 03-3843-1080
E-mail: forum@ref.or.jp, HP: http://www.ref.or.jp

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 21, No. 1, 1 – 2 (2017)

【巻頭言】

# 当フォーラムの誇りと悩み

森 千鶴夫
名古屋大学名誉教授

約 20 年前、1997 年にオーストラリアのシドニーにおける国際会議で、松浦辰雄先生が「放射線教育について」講演された。“一般人や教員・生徒達への放射線教育の必要性”を熱く語られ聴衆の大いなる賛同を得た。当時はすでに 1979 年のスリーマイルや 1986 年のチェルノブイリの原発事故の後で、原発に対する疑念がかなり広がりつつあった時期ではあったが、まだ原発の持つエネルギー源の多様性、経済性、炭酸ガス無排出による環境への軽負担などへの信頼があり、原子力エネルギーと放射線利用の促進のためには「放射線教育」の努力は欠かせない、との共通的な認識があった。放射線・放射能を正しく理解してもらうための努力を重ね、「放射線」に対する無用な恐れをなくすることが大切である、ということが当フォーラム設立の主旨である。

このような主旨に基づいて、主として会員を対象とした定期的な「勉強会」を行なって会員の研鑽に励み、その成果を「外に向けて発信」し続けてきた。この外へ向けての発信は大きな特徴で、大いに「誇り」としてよいと思われる。具体的には、小・中・高校の教員を対象に 2001 年から 2009 年までの 9 年間「エネルギー・環境・放射線セミナー（原子力体験セミナー、文系コース）」が全国 10 カ所で開催されたことが挙げられる。5 千名近くにのぼる受講者が、アンケートに①自身の学習のために知識を深めたい、②この分野の理解を深め授業に役立てたい、③その目的は達せられた、などと記している。各地域のフォーラム会員が共通の目的に向かって協力するよい機会にもなった。また、5 回にわたる「放射線教育に関する国際シンポジウム」がある。被爆地長崎での開催、福島原発事故地に近い郡山での開催など意義深い。そして、今も活発に公開パネル討論などが開催されているが、フォーラムの初期の目的である“一般人や教員・生徒達への放射線教育の必要性”が受け継がれていて、フォーラムの事務局、理事会、会員の努力の賜物である。

一方、スリーマイルやチェルノブイリの原発事故、東海村 JCO 臨界事故などがあり、ついには福島第一原発事故が発生するにおよんで、世の中の「原発への疑問」の傾向が強まり「放射線教育」のあり方が複雑になってきた。ここに当フォーラムの「悩み」があると私は思う。「原子力エネルギー利用と放射線利用は車の両輪である」と言われていたが、放射線教育は放射線利用の促進とともに原子力エネルギー利用推進の一翼を担っていた。このような一翼を担うのは当然であると考える人達に対して、放射線利用の促進や、放射線の持つ科学としての先進性・魅力を伝えることに、より意義を見出す人達もいて、放射線教育への取り組みにニュアンスのやや異なる面があった。

物理、化学、生物、等の基礎科目の中で、「放射線」は基礎的な項目として取り扱われてはいないが、生徒に自然や科学の魅力を伝え、感動を伝えるテーマとして好適であると言える。こうした感動を生徒に伝えることは極めて大切であると思う。このようなことをグループで話し合っていると、「原子力エネルギーはエネルギーの選択肢の一つであることを、その利点・欠点を丁寧に説明しつつ一般の人々に提示する義務が我々にはある。廃棄物や廃炉の処理などのこともあり、こうした面を含めての放射線教育の必要性は疑う余地がない」、との意見を聞く。このような意見を尤もだと納得し、そうしたことを踏まえつつ、各人はそれぞれに合ったやり方で貢献できるかと思う。当フォーラムのように属する人達の意見の幅は広いが、よく話し合い、協力し合いながら事に当たる組織は強く、柔軟性に富み、自ずと将来への展望も開けてくる。他の意見を尊重しつつ多様性を保ち協力し合うことは非常に大切であると思う。「悩み」は実は次への起爆剤でもある。組織の柔軟な活動と同時に個人の努力も欠かせない。

小さい頃、若い頃に実際に目にして感動した事柄は後年も鮮明に記憶されていることが多い。放射線教育実験ではアルファ線の霧箱の実験はその例であろう。霧箱の中の飛跡の成長をジッと無心に見入っている小学生や中学生が、あとの感想文に「放射線が飛ぶのを初めて見た！感動した！」と述べている。まさにその通りである。しかし、アルファ線が空気中を飛ぶのは 0.00000001 秒以内で、少なくとも高校生などにはそのことを知らせ、何故飛跡の成長方向が見えるかの理由を説明するのが望ましいが一般的にはその時間はない。現象の不思議さや解明の面白さに目を向けさせることの恰好な教材とも言えるのだが･･･。

前述の「エネルギー・環境・放射線セミナー」において、愛知・岐阜・三重地区では毎年反省会を持っていたのが今も「放射線教育フォーラム愛知・岐阜・三重地区新年勉強会」としてかなり活況を呈している。2018 年は 1 月 6 日（土）に開催されたが、私は一つとして「箔検電器によるクルックス管からの X 線の測定」なるテーマを報告した。

以前からティッシュペーパーを箔に用いた手作りの箔検電器をいろんなデモ実験に使用していたが、これを写真のように横型にして、スチロールフォームの窓から X 線をガラス瓶中の箔のある場所へ導入して測定することを考え、さる高校へ出かけて実験させて頂いた。箔検電器の積分型電離箱化である。ついでに、高校が持っている市販の箔検電器をお借りして、X 線によって空気中に作られた電荷を箔検電器の上部の円形の金属電極で集めることを試してみると、写真の横型の箔検電器とほぼ同じように、箔はかなり短い時間で閉じて行くことが分かった。これならば放射線測定器を持たない学校の先生方でもご自身で手持ちの市販の箔検電器を使って出来る。現在定量性について検討しているが、なんでもやってみることが大切だと改めて感じた。

どんなことにでも、ほんの少しでよいから何か新しいことを付け加えて行く努力が大切である。行動は誇りであり、悩みはそこからの努力がもたらす進歩への一里塚なのである。楽しみながら仕事や趣味に積極的に取り組もう！ そこには小さくても何か新しいことが待っている！ 例え何かが出なくても、何かをすること自体が個人にとっては歩みであり、結果として社会の活動であり社会への貢献である。日本の放射線教育モジュールと実践経験が国際社会で高く評価されている、との話を聞く。そうなのか！シニアよ、まだまだやれる！？

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 21, No. 1, 3 – 12 (2017)

【資料】

# 放射線を通して現代科学（素粒子、宇宙、量子論、相対論）に親しむ –新しい放射線教育の提案–

大野新一、大野　玲
理論放射線研究所
〒227-0054 横浜市青葉区しらとり台 12-5
E-mail: ohno-trl@01.246.ne.jp
（2018 年 3 月 2 日 受理）

**[要旨]** 物質構造の研究の中から放射線が発見された。放射線は、原子･分子を構成する微細粒子が互いの引力によって束縛し合う物質形成でなく、空間を単独で走っている状態である。発見された放射線は、より微細な構造、すなわち粒子の内部構造やエネルギー状態の研究に貢献した。初期では、重い原子から出る自然放射線が用いられたが、今では加速器から出る粒子が用いられる。加速エネルギーを大きくして宇宙創成時の反応を模擬する。衝突実験の結果の整理には、座標を定め、粒子の質量・速度を特定する。ここで相対論・量子論の理解が必要になる。本稿では、放射線発見の歴史、放射線の性質を通して、現代科学に親しむことを目指す放射線教育の提案をする。

## 1. 序―放射線とは

放射線は、普通の物質をつくる微細粒子が，何かの原因で運動エネルギーを得たものである。このような微細粒子の例を挙げれば、電子、原子核、そして原子核をつくる陽子および中性子、さらに粒子同士を結びつける力に関係する粒子、例えば電磁気力の場合の光子、核力の場合のパイ粒子などである。これら放射線粒子はどのようにして運動エネルギーを獲得するのだろうか。エネルギーは無から生まれないので、別の形のエネルギーからの変換である。すなわち重力、電磁力、強い力などの場に置かれた物質がもつ位置のエネルギーからの変換である。電子や陽子（あるいはイオン）を強い電場のなかに置くと自然に加速される。言うまでもなく加速器の原理である。宇宙空間で正負の粒子から成るプラズマが、速度の違いや磁場の作用によって正負の分離をきたすと荷電粒子が加速されて宇宙線が生まれる。超新星爆発では光、電子、核融合で生成した全粒子の爆発が起こり、そのまま宇宙線になる。宇宙の加速器では $10^{20-24}$ eV という途方もないエネルギーのものまで観測されており、詳しい機構の解明が望まれている。

次に重力から生まれる運動エネルギーを考える。質量をもつすべての粒子は、どんな距離の場合でも互いに引力が作用する。水素原子の集団（星雲や星の誕生）が互いの重力で収縮すると、内部で熱、すなわち粒子の運動エネルギーが発生する。凝集した粒子の密度・温度が高ければ、運動する粒子としての圧力を示す。この圧力が重力収縮に抗して、水素原子集団をある大きさに保ち、温度に応じた光、赤外線・マイクロ波（いわゆる熱放射）を放出する。熱放射によりエネルギーが外に持ち出されて始めて水素原子集団内の粒子は

分子を形成し互いの距離を小さくすることができ、広い意味での物質形成が進む。あるいはまた、別のところから飛来してくる放射線が水素原子内の電子を弾き飛ばす（イオン化）ことがあれば、新たに重力とは比べ物にならない強い電磁力も加わり、粒子の凝集化が急速にすすみ、物質化が進む。

重力と電磁力で物質の凝集化がすすむと、その箇所では（宇宙全体の膨張とは無関係に）局所的に高温になり、水素原子核同士の接近（$10^{-15}$ m 以内）から強い力による物質凝集、すなわち核融合反応が始まる。すなわち太陽などの恒星の誕生である。熱放射も短波長側の放射にシフトするが、他にも太陽風（電子や陽子）や太陽表面の爆発などでエネルギーは放出される。しかし星に質量がある限り重力が働き、その極限に達して星の中心部で陽子と電子から中性子が生まれ（すると原子の大きさが核子の大きさになる）、エネルギーをニュートリノが遠くへ持ちだす。星の中心部分の陥没による反動で星の外側部分は一挙に吹き飛ばされる。いわゆる超新星爆発であり、それまで核融合反応でつくられた原子と大量に存在する中性子が加わって、合成された大小さまざまな原子核が宇宙空間に高速で放出される。これが宇宙放射線の主たるものである。放出される原子核はいずれも複数の中性子と陽子がパイ粒子で閉じ込められている状態であるが、やがて強い力の作用で何らかのエネルギーを放出しては安定化が進む。ここでいう“やがて”は 46 億年間（おそらく 50 - 60 億年前の超新星爆発によって生成した物質粒子）に及ぶのが、現太陽系に残存する 100 種類ほどの原子である。その中で特に大きい原子核（ウランやトリウムなど）が時々壊れて内部から陽子 2 個と中性子 2 個から成るアルファ粒子や電子を放出する。これが自然放射線である。いっぽう電磁波（光子）は、荷電粒子の運動状態が変化するときに、その電場の変化が周囲の空間に広がる。電子、陽子などの荷電粒子の運動は、自転する中性子星のまわりの磁場によっても、加速器内に設置された電磁石によっても、あるいは重い原子核の近傍の強い電場によっても、進行方向が曲げられ、エネルギーの一部はそのときに放射光、制動Ｘ線として放出される。原子内軌道電子の運動状態が変化するときは特性Ｘ線が放出される。

宇宙全体は膨張しつづけ冷却の一途をたどるが、はじめに存在したゆらぎにより水素原子同士の重力収縮が起こって局所化が始まる。ある意味で全体の宇宙からの孤立化である。そして電磁力による水素分子の形成、原子核の多様化、多様な分子の形成、再び局部的に重力による収縮で太陽系がつくられ、生物が存在するまでに至った。局所化も実は星雲、銀河、恒星系、惑星などと様々な段階のものがあるが、ここでは詳述しない。“ある意味で”の孤立化と言ったが、しかし超新星爆発で放出される粒子は、まずケイ素、マグネシウム、鉄などの酸化物の類が凝集してダスト（大きさ : サブミクロン）をつくり、そこに宇宙線・光などの作用で生成したメタン、アンモニア、水などの分子が低温のダスト表面に降り積もり、さらに他の星あるいは星雲からの放射線の作用で化学合成が進み、分子の多様化が起こる。このことに注目すれば、膨張宇宙における進化のなかで孤立化を防ぎ、物質の多様化を促しているのが放射線であると言える。

## 2. 物質構造の研究と放射線の発見 [1,2,3)]

### 2.1　元素と原子

ギリシャ時代に万物をつくる元素として火、空気、水、土が、そして物質の状態変化を

起こす実体として原子の運動が提案されていたが、定量的な観測に基づくものではなかった。温度、質量、体積の測定、物質の分離などの技術を身につけ、多様な化学反応を研究した 19 世紀の化学者は、反応前後の質量の不変性、気体反応における圧力の変化などの研究から、物質の基本単位として各元素（100 種近い元素）毎に原子（アトム）が存在することに気づいていた。またボルタ電池 (1800) や真空ポンプの技術も普及し始めていた。

**2.2　電気の研究から真空放電の実験へ**

身近にある物質のどれをとっても、実はその内部に多数の電子が存在する。異なる 2 種類の物質をとりあげて互いに接触させる（効率を高めるために擦り合わせる）と一方の物質から他方へと電子が少しではあるが流れる。摩擦電気といってギリシャ時代から知られていた。ボルタが亜鉛と銅の金属棒を硫酸銅水溶液に侵し、両金属の間を定常的に電子が流れる電池をつくり(1800)、電気の定量的な研究が可能になり、当時すでに知られていた磁力も電流によって生じることもわかった（エルステッド 1820）。

摩擦電気による放電現象（発光現象を伴う）を真空ポンプによって低圧気体中で行う実験も電池を組み合わせて進んだ。すなわち陰極から“何か”が出て真空中を走り陽極に向かうこと、走る途中でガラス管と衝突して緑色光を発することなどが報告された。この“何か”は陰極線と呼ばれ、ヒットルフ、クルックス、ヘルツ、ペランらによって研究され、陰極線の道筋が電場によって、また磁場によって偏向すること、極めて薄い膜を透過すること、運動量をもっていて小さい物体を動かすこともわかり、これらの結果から負の電荷を持つ微小な粒子の高速の流れであることがわかってきた。ここで登場したのが J.J.トムソンである。彼こそは電子の発見者であり、すべての原子に共通に含まれる普遍的な粒子であることを唱えた。

**2.3　陰極線に関するトムソンの研究**

すべての物質中に含まれる電子の実像を探るに、もっとも優れた方法は真空中を走る電子を調べることである。電子の海のなかで電子を観測することはできず、またある物体全体がもつ何らかの性質を観測しそこから電子 1 個の性質を引き出すことは出来ない。トムソンは、本質的に異なる 2 つの方法を採用した。1 つは、電子の流れ（＝陰極線）に電場や磁場を作用させ、電子の通る道筋 (=軌跡) の変化の様子をしらべる。他の 1 つは、電子の流れによって真空容器の一方の端から他方の端に運び込まれるもの、エネルギーと電気量のそれぞれの合計値を同時に測定することである。第 1 の方法は、走る電子そのものでなくその周囲を取り巻く巨視的な姿（道筋）を見るもの、第 2 の方法は一箇所に電子を大量に打ち込み積算値（温度上昇とか電気量）を測定するものである。

まず第 2 の方法：陰極線を構成する粒子の質量 $m$ と電荷 $e$ を仮定し、一定時間に粒子の $N$ 個が陽極に打ち込まれたとする。積算される質量 $mN$、電荷 $eN = Q$、また走っている粒子の運動エネルギーの合計 $(1/2)mv^2 \cdot N = W$ が陽極（熱容量が既知であれば、温度上昇の測定から $W$ が判る。ここで $v$ は粒子の走る速度）に注入される。つぎに第 1 の方法で、陰極線が一様な磁場 $B$ の中で曲げられるときの曲率半径 $R$ を測定する。$Mv^2/R = evB$ の関係から $v$ と $m/e$ が求められる：

$$v = 2W/QBR, \quad m/e = B^2R^2Q/2W$$

もう 1 つの方法では、電場と磁場による陰極線の偏向を組み合わせることから $v$ と $m/e$ を求める。まず一様な電場 $E$ のところ（長さ $l$）を陰極線が通り過ぎるとき、陰極線内の

電子が受ける運動量変化（= 力積 = 力×時間 = $eE \cdot l/v$、つぎに磁場 $B$ を作用させて陰極線の進行方向と直角の方向に逆向きに働くようにして相殺する。言い換えれば $B$ を変化させて陰極線がちょうど直進する条件を求めて、$eE = evB$ を得る。この式から $v$ が得られ、さらに前式に代入して陰極線を構成する粒子の $e/m$ が求められる。これらの結果は、陰極線粒子の質量/電荷の比（$m/e$）が普遍的な値であることを示した。即ち二酸化炭素を封入したアルミニウム陰極でも、空気を封入した白金陰極のときでも、陰極線の速度が違うとき、つまり $v$ が異なるときでも $m/e$ の値は常に同じ値であった。またトムソンは光照射した亜鉛板から放出される粒子も、熱した炭素フィラメントから放出された粒子も、いずれも真空中で同じ $m/e$ の値を持つことを示した (1899〉。

**2.4　ゼーマン効果: 原子の構成要素の発見**

ある元素を含む物質を炎の中に入れると、その元素に特有の波長の発光を出す。また、この元素を含む気体に白色光を通すと、白色光からはその元素に特有の波長が吸収される。ゼーマンは、ナトリウム元素の発光線が通常は細くて鮮明なのに、磁場中では幅が広がり、その幅の広がりが磁場の強度に比例することを見出した。このときの比例定数から、原子の中の電荷の担い手である粒子の $m/e$ の値が求められ、それがトムソンの求めた $m/e$ の値と一致していた。そこでトムソンは、発光や吸収の原因となる振動する電荷がすべての原子に共通に含まれていること、その粒子は原子から取り出され、原子とは独立に存在できること: $m/e = 0.5687\times10^{-11}$ kg/C を示した。

**2.5　電子のもつ電荷の測定**

ミリカンは 1909 年に、噴霧器を用いてつくった小さな油適に電荷を与え、その油滴が垂直方向の電場の作用と重力により上下に動く (空気中の粘性を考慮する）速度から単位電荷の値を求めた（$= 1.6\times10^{-19}$ C)。この種の測定は、すでにトムソンらにより水蒸気を用いてなされていたが、水滴の表面から絶えず水が蒸発するために測定値が定まらなかったが、ミリカンらは蒸発の無い油滴を用いて成功したのである。

単位電荷の値が求められると、すでに電気分解で知られていた 1 モル（水素 1 グラムとちょうど反応する原子・分子・イオンの量: 等量) のイオンの反応に必要な電気量 (1 Faraday ＝96,500 C) の値からアボガドロ数＝96,500 F / $1.6\times10^{-19}$ C = $6.02\times10^{23}$ が得られた。また、電気分解の $M(H^+)/e$ の値から水素イオン（陽子）の質量が $1.66\times10^{-27}$ kg、陰極線の $m/e$ の値から電子の質量が $9\times10^{-31}$ kg と計算された。

**2.6　真空放電から X 線の発見**

電子の存在は、真空放電や原子発光の実験から確実なものとなりつつあった。この真空放電の実験の最中で、偶然のことから発見されたのが X 線である。レントゲンは 1895 年に、暗くなった部屋で真空放電（0.1 Pa の真空度、50 kV の電圧）の実験を続けているうちに、黒い紙で包んでいた放電管から 2 m も離れて置いていた蛍光板（白金シアン化バリウムを塗布したもの）が光ることに気づいた。それは放電管の中で陰極線がガラス管壁に衝突しているところから発生し、電場や磁場によって曲げられることなく、また書物や木片をかなり自由に透過して蛍光板に達するという点で、陰極線（= 電子の流れ）とは違うものであり、“X 線”と名づけられ、世界中で評判を博し、1896 年中に 1000 報を越える報告が発表された。

**2.7　X 線の発生と吸収**

電荷を持つ粒子（例えば電子）が加速度を伴って動くとき、離れた地点にある別の電子がその影響を受ける。これが光の発生と吸収である。電荷の動きの速さの大小により種々のエネルギーの光 (電磁波) が存在する。光は発生源を中心として空間全体を広がって進行するが、それは一定の振動数をもつ波として広がる。

ここではX線による気体のイオン化に関するトムソンとラザフォードの報告を紹介する。これにより気体の電気伝導の実験が可能となったのである。長いガラス管の中を一方向に空気を流しつつ、上流の空気のある部分にX線を照射、その下流部分の空気の電導性を測定する。測定は2枚の電位差をかけた電極板に流れる電流を測定する。X線照射部分から2枚の電極までの距離はX線照射後の時間の目安となる。

**2.8 放射能の発見**

レントゲンがX線の発見を報告してから4ヵ月後（1896年2月)、ベクレルによる放射能の発見がなされた。ベクレルは、陰極線がガラス壁に衝突して発光するところからX線が発生することに着目し、X線の発生は発光現象と関連があると考えた。彼は、太陽光で活性化したりん光性物質（例：ウラン塩）から“X線”が放射されるだろうと期待した。そして太陽光照射とは関係なく、ウラン塩から常に“放射線”が出てくることを確認したのである。

ベクレルによれば、「2月26，27日は太陽が断続的にしか姿を見せなかったので、実験を途中でやめてそのまま（ウラン塩＋厚さ0.1 mmの十字型遮光版＋写真乾板）机の引き出しの暗がりに一緒に入れて置いた。翌日も太陽は現れず、3月1日に乾板を現像してみたら、予期に反して強い十字架像が現れた。」さらに2ヵ月後の報告では、「ウラン塩がりん光性か否か、結晶性か溶融物か、溶液であるかにも関係なく、ウラン元素からX線と同じ性質の放射線が出ていることを報告した。

ウラン以外の元素からもX線が出るだろうか? キュリー夫妻はトリウムからも出ることを報告した後、さらに強度の高い放射線（ウランの400倍および数万倍）を出し続ける元素（それぞれポロニウムおよびラジウム）を発見した。キュリー夫妻が優れていたのは放射線の気体電離作用を利用した電気量測定を使って放射能を定量的に測定したことである。

**2.9 ラザフォードのアルファ粒子の研究**

気体中を走るアルファ粒子は気体中の分子を次々とイオン化する。1個のアルファ線（ポロニウムからのアルファ粒子は数MeVのエネルギーをもつ）により、およそ$10^5$個ものイオン化が起こる。これを予め電位をかけた電極間にパルス的に流れる電流（アルファ粒子通過の1個毎に分離して）として測定すればアルファ粒子の通過を検知できる。あるいはアルファ粒子が蛍光性物質（例：硫化亜鉛、白金シアン化バリウム、タングステン酸カルシウムなど）にぶつかるとその箇所が閃光を発する。この2つの方法によってアルファ粒子を1個1個検出し、その位置を知ることができる。

アルファ粒子がヘリウム原子核であることも簡単な装置を使って証明された。アルファ粒子が薄いガラス管壁を突き抜けることを利用して、水銀ポンプを利用して発生したアルファ粒子を毛細管内に集め、充分の個数が得られた後で放電させ、その発光スペクトルを太陽スペクトルと比較することからヘリウム原子核であることを確認した。

**2.10. 原子核の発見**

ラザフォードは、1907年に、金属箔にアルファ粒子を通過させて、散乱によるアルファ

粒子の飛跡の広がりを観測し始める。やがてアルファ粒子の何個かは入射方向に対して後方に跳ね返される現象が見出された。大きなエネルギーをもつアルファ粒子が電荷を持つ標的粒子との衝突で跳ね返えされるためには、アルファ粒子は巨大な電場に逢わなければならない。言い換えれば衝突相手の荷電粒子が極く小さく、そしてその極く近くにまで到達しなければならない。今日では、原子核の半径は　$R = 1.5\times10^{-13}\ A^{1/3}$　(A は原子の質量数）であることが知られている。H、He、Be、・・・U までの全原子についての測定がなされた。

ラザフォードの仕事の意義は、「原子のもつ正電荷と質量は小さな核の中に集中しており、その周りを負電荷をもつ電子がまわっている」という原子構造を提案した（1911）だけでなく、それを調べる手段を発見したことである。この方法は、放射線（= 加速粒子）を用いる物質構造の研究手法として今日も変ることなく使われている。

**2.11 中性子の発見**

アルファ粒子は、＋2 の電荷をもつため、同じく＋の電荷をもつ他の原子核に近づくためには反発力からの制約を受ける。そのためアルファ粒子を用いた重い原子核の研究には限界があった。1919 年、ラザフォードはアルファ粒子を窒素原子核にぶつける反応から陽子（水素の原子核）が飛び出すことを見出した：　$^{4}He + ^{14}N \rightarrow ^{17}O + ^{1}H$
その後、B, N, F, Ne, Na, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K についても同様の反応を報告した。

1930 年、ドイツのボーテとベッカーは、アルファ粒子と Be の衝突からでるはずの“陽子”が途中の物体を透過して検出器に達することを見つけ、Be の場合では“ガンマ線”がでるのであろうと報告した。パリのキュリー研究所のジョリオ・キュリー夫妻（マリー・キュリーの娘イレーヌ・キュリーとその夫フレデリック・ジョリオ）は、強力な $^{210}Po$ のアルファ線源を用いて実験を行い（1931.12.21 報告）、この“ガンマ線”がパラフィンのような有機物質を通るとそこから陽子が出ることを報告した (1932.1.18)。そしてこの陽子のエネルギー測定から“ガンマ線”のエネルギーは実験に用いたアルファ粒子のエネルギーの 10 倍も大きいエネルギーであると報告した（1932.2.2）。一連の報告を見て、この“ガンマ線”はラザフォードが講義中に話していた“中性子”であると正しい解釈を報告したのがラザフォードのかつての学生であったキャベンディッシュ研究所のチャドウィックであった (1932.2.17)。

こうして中性子が発見されると、その波及的効果が直ちに 2 つの方向に展開した。1 つは、陽子と中性子とから原子核が構成されるという核構造模型（イワネンコ、ハイゼンベルク、フェルミらの研究）、他は、これまでのアルファ粒子を使った原子核反応の研究に代わる中性子による核反応の研究である（ローマ大学のフェルミ）。中性子は単に現象を説明するための観念的な粒子でなく、物的な感覚的な存在となった。それはクーロン反発力がなく自由に原子核に近づき得る粒子であり、やがて“速い中性子”と“遅い中性子”による核反応の比較、中性子検出器の開発など、短い期間に大きな進展を見せた。

## 3. 放射線と物質の相互作用

### 3.1　原子・分子に対する放射線作用

堅くて壊れることのないとされた原子の存在が確定したのは、小さな原子核の周りをいくつもの電子が高速で走り回るという描像が明確になったときである。すなわち、原子の

内部のほとんどは真空であり、そこを放射線（とりわけ電荷を持たない粒子の場合）は何の抵抗もなく走り過ぎるのである。電荷を持つ高速粒子が放射線である場合（アルファ線、ベータ線、イオン線）、原子の中の原子核や電子の近傍を通過するときにクーロン力が瞬間的に作用し、条件さえ適合すれば原子から構成粒子が原子の外へ飛び出すことになる。ここから放射線作用が始まる。

### 3.2　宇宙進化と放射線の関わり [4)]

138 億年前に誕生した宇宙では、現在までの大部分の時間を通して物質と放射線の両方が存在してきた。4 種類の力（重力、弱い力、クーロン力、強い力）によって物質が形成されると同時に絶えず放射線が宇宙空間に送り込まれ、多種類の原子と複雑化した高分子が生成され、生命の誕生にも繋がった。誕生直後の宇宙は高温高圧の平衡状態であったが、今では平均温度はほぼ 3 K、多種多様な構造（星間分子、ダスト、星、惑星、生命、銀河、宇宙線）が形成されている。ここで注目すべきことは、①どのようにして物質が集まって星が形成されるのか、星の中で何が起こるのか、高エネルギーの粒子線（= 宇宙線）がどのようにして発生するのか、そして、②宇宙線のもつ大きなエネルギーが遠く離れた場所に存在する物質粒子に小分けにして配分される様子を理解することである。現在の宇宙における物質と宇宙線をつくる元素は、まず多いのは水素、ヘリウム、次に炭素、窒素、酸素、そして、マグネシウム、ケイ素、鉄、さらに重い元素も加わるが、原子番号 92 のウラン以上になると不安定さのために存在しなくなる。放射線の誕生と消滅から宇宙の進化における放射線の役割を考えることも大切である。

### 3.3　水 1 kg に 1 J (ジュール) の放射線エネルギーが吸収されると?

1 kg の水の中にはおよそ $10^{25}$ 個の水分子が含まれる。室温（27 □ = 300 K）であればすべての分子が~kT (0.025 eV) のエネルギーを持つので 1 kg では~40,000 J の熱エネルギーがある。ここに放射線から 1 J 受け取ると~40,001 J になる?の話である。水の比熱 (4.2 kJ/kg) から予想される温度上昇は 0.00024 □である。1 リットルの水をビーカーに入れて 1 ワットの豆電球を使って 1 秒間だけ加熱するときの温度上昇である。 1 J (= $1/(1.6\times10^{-19})$ eV) のエネルギーが全分子に平均して与えられたら 1 分子あたりのエネルギー吸収は $1.9\times10^{-7}$ eV である。これが現実的な計算でないことは言うまでもない。量子化されているからである。分子内で定常波として存在する電子が他の定常波の状態に遷移することはできる。このための最低エネルギーは水分子では 7.5 eV であるので、これより小さい量のエネルギーを受け取ることはできない。水分子から電子を分子外に飛び出させるには最低でも 12.6 eV のエネルギーが必要である。水などの簡単な分子の場合で、放射線エネルギー吸収 30 eV によって平均 1 個の電子放出が起こることが知られている。

### 3.4　生命はなぜ放射線に弱いのか?

細胞も人間も、すべての生命は、蛋白質と DNA 分子によって生命活動の機能が維持されている。ここでは DNA 分子 (仮に質量：$6\times10^{-15}$ kg とする) に対する 1 J/kg の放射線エネルギー吸収効果を考えてみよう。もし均一に放射線エネルギー吸収があったと仮定すれば、前節の計算から 1 個の DNA 分子は $2.1\times10^{17}$ eV のエネルギーを吸収し、(さらに平均して 30 eV　あたり 1 回の損傷が起きると仮定すると)、DNA の分子は $1.2\times10^{3}$ 個の損傷（あるいは結合切断）を受ける。同じ 1 J/kg ( = シーベルト)でも水分子ではほとんど影響なしであったが、DNA 分子では決定的ともいえる破壊である。普通、議論される線量 1 ミ

リシーベルトであれば、DNA 分子あたり 1 個の損傷である。

平均を考える際に重要なことがある。「1 ミリシーベルトではどの DNA 分子も平均して 1 個の損傷を受ける」という情報があっても、損傷はめくらめっぽうで起こるので損傷がゼロのものもあれば、損傷を 2 個、3 個・・・と受ける DNA もあらわれる。平均値が 1 のときの損傷の確率分布（ポアッソン分布）$f(x)$ は $f(0) = e^{-1}/0! = 0.37$、$f(1) = e^{-1}/1! = 0.37$、$f(2) = e^{-1}/2! = 0.18$、$f(3) = e^{-1}/3! = 0.06$、・・・$f(10) = 2.3^{-7}$ である。すなわち平均 1 個の損傷という場合でも、損傷なしの確率は 37%、1 個の損傷の場合も 37%、2 個の損傷を受ける場合は 18%、3 個の損傷を受ける場合も 6%存在することである。重要な DNA が致命的な損傷を受けることも起こり得るのである。

## 4. 量子論と相対論の必要性 [5)]

### 4.1 量子論の必要

水分子が室温で走る速度はおよそ 600 m/秒 であるが、この程度の速さで 2 つの水分子が互いにぶつかり合っても水分子が壊れることはない。1 個の水分子は、２個の陽子、１個の酸素原子核、10 個の電子の集合体であるが、これら 13 個の微細粒子は互いに働くクーロン力の下で定常的な運動状態にある。電子の運動範囲を辿ると一定の大きさの折れ曲がった水分子（H-O-H）の構造が浮んでくる。H と O の２つの原子核領域にまたがって電子が頻繁に存在することが化学結合である。またこのような水分子が 600 m/秒程度の速度でぶつかり合っても壊れることはない（ただし 10 倍以上の大きい速さで衝突するときは別である）。分子は、複数個の原子核のクーロン力によって捉えられた電子が定常波を形成（分子軌道形成による共有結合）して安定性を保つ。このような原子・分子の安定性は電子が運動するとき波のような性質をもつこと、そして静電荷に引き付けられて狭い領域に運動が束縛されることから定在波（= 定常波：時間が経過しても形が変化しない波）を形成することとして理解される。電子の定常波は３次元、しかも中心に束縛された定常波であり、その形によって種々の記号で呼ばれる。原子の場合は s-、p-、d-軌道など、水分子の場合は $1b_1$、$3a_1$、$1b_2$、$2a_1$、$1a_1$ などの分子軌道である。電磁波を放出することもなく、水分子は永久に安定である。

この安定な原子・分子に対して放射線（= 高速で走る荷電粒子）はどのように作用するのだろうか？原子･分子の大きさ 0.1 nm を仮に 1 兆倍すれば 100 m（例えてみれば東京ドーム）になる。電子（$10^{-15}$ m）、陽子、中性子の大きさは 1 mm であるが、電子は東京ドーム内で毎秒 $10^{16}$ - $10^{17}$) 回も原子核の周辺をまわり定在波をつくる (量子化) ことにより空間的な形状（原子・分子軌道の形）が安定する。定在波は波ではあるが時間的に形が変化しない。すなわち他の粒子と相互作用してエネルギーをやり取りしない限り、電子は波として行動する。この電子が何かの原因によって 10 - 30 eV のエネルギーを受け取ると、原子核からの束縛から解放されて“東京ドーム”の外に飛び出す。実際には、東京ドームではなくて原子または分子の外へと飛び出すのであるが、これを原子・分子のイオン化（電離）という。ここで化学結合（O-H）にあずかる電子、つまり O と H の間に存在していた電子が突然に消えたとすると 2 つの原子核は陽電荷同士の反発力によって離れ離れになる。たとえば強い電場にさらされるとか、光を吸収するとか、あるいは高エネルギーの微細粒子が原子･分子の中に進入してきて電子と衝突するとかである。高エネルギー粒子のうちでも

電子や陽子、その他の荷電粒子の場合は原子・分子内の電子に直接の衝突でなくても、近傍を走り過ぎるときに短時間だけ力が働きエネルギーのやり取りが行われる。

高速電子が結晶格子を通過するときも、エネルギーのやり取りが行われない限り、一般に波が同時に多数の物体から散乱を受けるのと同じように、干渉効果があらわれる。しかし最終的に検出器に至り、そこでエネルギーのやり取りを行うので検出器の中のどこか 1 点において粒子としての性格を現わすのである。波の性質を持つ放射線（微細な粒子）も分子内電子と衝突してエネルギーを与えるときは粒子の性質を示すのである。

**4.2 相対論の必要性**

粒子間の衝突実験を計画し、結果を整理するために、粒子の質量や速度を特定し、反応確率を用いるが、物体の運動を記述するときに座標を使う。座標としては普通に使われるのは 3 次元空間と時間を含む 4 次元直交座標で物体の位置を表す。今 2 つの座標系（$x, y, z, t$）および（$X, Y, Z, T$）が互いに一定の速度 $V$ で運動しているとき、物体に力が作用するなどして微小変位が生じ、物体の座標が ($x+dx,\ y+dy,\ z+dz,\ t+dt$) および ($X+dX,\ Y+dY,\ Z+dZ,\ T+dT$) になったとしよう。このとき古い常識では ① $dx^2+dy^2+dz^2=dX^2+dY^2+dZ^2$ (空間変位の大きさが共通）および ② $dt=dT$（時間変位の大きさが共通）である。すなわち空間と時間はそれぞれ無関係であり、力学法則も 2 つの座標系で共通となる。力学法則 $m$×加速度=力は両座標系で変りない。ところがアインシュタインは、空間と時間の性質を研究し(1905 年)、ある物体の座標は 4 元ベクトル（$x, y, z, ict$）であらわされ、③$dx^2+dy^2+dz^2+d(ict)^2=dX^2+dY^2+dZ^2+d(icT)^2$ が両座標系で共通であり、これは物理法則であると主張した (光速度 $c$、また $i^2=-1$)。さらに座標変換（互いに速度 $V$ で動いている）に対して不変な新しい法則を探すために③式の両辺に座標変換不変量の $m/dt(1-V^2/c^2)^{1/2}$ を乗じて新しい 4 元ベクトルを得る。その 4 元運動量ベクトルの大きさを求めると

$$P_s^2+m^2c^2=(E/c)^2$$

ただし $P_s^2=m^2V^2/\sqrt{(1-V^2/c^2)}$ である。この式から粒子が光($m=0$）のとき、運動量 $P_s$ は $E/c$（すなわち光子の運動量は光子エネルギー/$c$）であり、また運動量 0 の物体（静止物体）のエネルギーは $E_0=mc^2$ と表される。

## 5. 結語

2. で説明した物質構造の研究とそこから発見された X 線、電子、原子核、中性子などの物語りに使われた実験のほとんど（ポロニウムを用いるアルファ線源は別として）は、ガラス細工で作られ、小さな机上で行われ、古典力学を使った簡単な考え方と計算に基づくものであった。ここから放射線と原子（分子）の相互 ($10^6$ m/s) 作用を考えるのが教育的であると筆者は考える。例えば水素原子の中の電子は毎秒~1,000 km の速度 ($10^6$ m/s) で陽子を周回しその周波数は $10^{16}$ Hz である。周波数 $10^{16}$ Hz の光の波はタイミングが合えば電子に吸収される。周波数の合わない光は自由に原子内を通過するが、周波数の極めて大きい光（ガンマ線）は電子に直撃してその運動量（3. を参照）を与えてコンプトン散乱を起こす。また水素原子にゆっくりと近づいてくる電子は陽子に近づくに至らずに周回電子にクーロン反発力によって弾かれる。周回電子の速度 1000 km/s よりも速い高速電子は、多くの場合で原子内を自由に走り抜ける。が時に周回電子の極く近くを通過するときには瞬間的にクーロン力が働いて（力×時間 ＝ 運動量変化）周回電子が遠くへ弾き飛ばされる。

ここからイオン化が始まり、分子の場合で化学結合に関係する電子が飛ばされた場合には化学結合が切れる。これが放射線作用である。

こうした考察から放射線を定義することが出来る。放射線とは、「原子･分子のなかを素通りし､その際にまれではあるが原子分子内の電子を弾き飛ばすものである｡」これを原子･分子の集合体である巨視的物体に当てはめて言い直すと、放射線は、「物体の姿・形を崩すことなく、物体を透過し、そのさいに物体の内部に少しずつ化学変化を起こすもの」である。このような“もの”を具体的に示すと、① 高い周波数（$>10^{16}$ Hz）の電磁波、② 高速（$>10^{6}$ m/s）の荷電粒子（ただし原子の大きさよりもはるかに小さい粒子)、③ 中性子である。物質構造の立場からみると、放射線は物体内部の様子をしらべる、とりわけ原子・分子の内部構造をしらべる有力な手段となる。さらに言えば、放射線は物体の内部で化学反応を起こすので、温度を上げることなく、また物体の形状を変えることなく化学反応を起こすことから、多くの応用がなされている。

現在の物質構造の研究では、陽子、中性子、パイ粒子などはクォークによって構成される、さらにクォークや電子、光子、ニュートリノなどのすべてが極めて小さい (電子などの $10^{34}$ 分の 1 の程度) とする超弦理論 (超ひも理論) などが盛んに研究されている。

**参考文献**


1) セグレ, E, X 線からクォークまで, みすず書房 (1982)
2) ワインバーグ, S, 電子と原子核の発見, 日経サイエンス社 (1986)
3) 自然科学原典シリーズ : 近代科学の源流－物理学編, 北大図書刊行会
4) 大野新一, 宇宙進化における放射線の役割, 放射線教育, 18(1), 71-80 (2014) ; 大野新一, 大野　玲, 放射線作用における不可逆性－宇宙進化における役割, 放射線教育, 17(1), 27-36 (2013)
5) 大野新一, これからの理科教育と放射線 (1)　量子論･相対論の導入とそのための放射線の活用, 放射線教育, 7(1), 27-34 (2003)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 21, No. 1, 13 – 52(2017)

【資料】　【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第１回　見えない光を求めて＊1

吉川 秀夫＊2
元日本原子力研究所

### もっと光を

この世界は光とともに開かれたといわれています。創世記には神が「光あれ」といわれて、この世が始まったことが記されています。また日本の神話でも、天の岩屋戸を引き開けて天照大神を出現させ、この世に光をもたらして現世が始まったということです。

ルネッサンス以前の人にとっては、太古の昔からそうでしたが、光を作り出す方法は、物を燃やすときに発生する「火」でした。多分雷が落ちて燃える火を人類が利用したのがはじまりだったでしょう。

やがて薪や油を燃やしてこれを灯火として用いることを覚え、さらには「ろうそく」を発明して、簡単に持ち運びができるようにしました。歴史の長い間、そのような状態が続いたのです。そして光を通す透明なガラスの技術が発達してレンズを生み出し、眼鏡から望遠鏡へと展望は広がるのです。

1610年、ガリレオ・ガリレイ (1564-1642) は彼自身の製作による5番目の、倍率30倍の望遠鏡を天空に向けたのでした。そして月面の凹凸、木星の4個の衛星、太陽の黒点、金星の満ち欠けなどの、一連の驚嘆すべき新現象を発見したのでした。

彼は自分の見たものを自著の『シデリウス・ヌンチウス(星界の報告)』に発表しました。それによって天体の成り立ちを明らかにしたのです。古ぼけた宇宙論は、消え去っていく運命にありました。

それでも人類にとって、変わることのない光の源は、常に太陽そのものでした。その太陽の光を分析してみせたのが、アイザック・ニュートン (1642-1727) でした。彼はガリレイがイタリアで亡くなった年に、イギリスで生まれたのです。彼は 24 歳のとき、ある晴れた日に、暗い部屋で、小さな穴から差し込む太陽の白い光を、プリズムに通してみたのです。光は屈折し、虹と同じように 7 色の光の帯ができたのです。これが出発点でした。

その後も、例えば、別のプリズムでその 7 色をもとの白い光に戻すというような、様々な実験を行ったのでした。この一連のプリズム実験は、若いニュートンをいっぺんに有名にしたのです。彼は「万有引力の法則を発見したことで名を残しましたが、そのほかにも光と色に関する研究を進め、1704 年にその成果を『オプティクス (光学)』という本に著わしました。彼はすでに光は粒子によって成り立っていることを示唆していたのです。

偉大な科学者ニュートンは、ウエストミンスター寺院に葬られましたが、その墓碑には次のような詩句が刻まれています。

＊２　著者の略歴等は５３頁に記載

神はいわれた、ニュートン出よ、と。
するとすべてが明るくなった。

17 世紀も半ばになると、望遠鏡で見た宇宙やプリズムの理論が、ようやくのことで世間に受け容れられるになりました。それと同時に、光のほうも神秘的な意味を剥奪され、純粋に科学的に取り扱えるものへと変わっていったのです。

しかし光の精神的な意義を重視する、芸術界からの反発は大変なものでした。科学による教養体験よりも、崇高な自然体験の方が、より価値があると主張し続けたのです。あの美しい虹を、屈折率による光の分散とやらで説明されたくない、というのです。

ワーズワース (1770-1850) は、『発想の転換』と題する詩の中で次のようにうたっています。

自然が与えてくれる教訓は快く胸をうつ。
我らの小賢しい知性ときたら、物事の
美しい姿を台なしにしてしまうだけだ、
人間は分析することでそれをぶち壊す。

科学も学問ももうたくさん、といいたい。
それらの不毛の書物を閉じるがいい。
外に出るのだ、万物を見、万象に感動する
心を抱いて、外に出るのだ。

ドイツの文豪ゲーテ (1749-1832) は、ニュートンに対抗して、光が彩るところの色彩について、自分だけが科学的と称する考察を行い、『色彩論』を著わしています。その彼が生涯を終えるとき、「もっと光を」といって息をひきとったといわれています。おおよそ、160 年前のことでした。

## 隠れていた自然の力

1800 年には、イギリスの天文学者ハーシェルによって、赤外線が発見されました。プリズムで分けられた太陽光の各色の温度変化を調べて、赤の外側の光が来ていないところでも、温度計が、上昇することに気がついたことによります。

翌 1801 年には、ドイツの化学者リッターによって、紫外線が発見されたのでした。この場合は、太陽光のスペクトルの各色による化学変化を調べて、紫の外側でも化学変化が起きることを確かめたことによるものです。

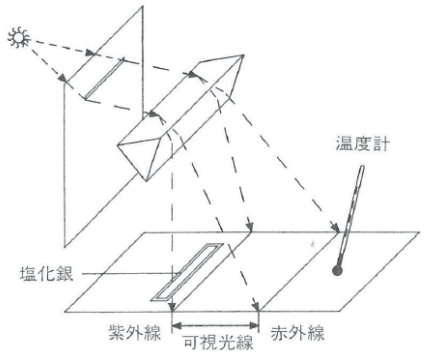



図-1　太陽光のプリズム分析

19 世紀に入って、物理学は嵐のように科学の世界を席捲しました。今まで見えなかったものが見え、それに今までにはなかった理論で説明がつけられたのです。現在でいうところの、古典物理学がピークを迎えようとしていた時代です。その中心になったのが電気という、目には見えない粒子の流体でした。

電気に関する研究の新しい展開は、1800 年イタリアのアレッサンドロ・ボルタ(1745-1827) の電池の発明とともに始まりました。これによって電気を定常電流として容易に取り出すことが可能になったからです。彼の名は現在も電圧(ボルト) の単位として残っています。

電流に関する秘密が次第に明らかになると、科学者たちは電気と磁気の関係が気になり始めました。電気と磁気の間には、何らかのつながりがあるに違いないということは、ずっと以前から考えられてはいましたが、正確なことはなかなか分からなかったのです。

イギリスのマイケル・ファラデー (1791-1867) は、1831 年に針金のコイルの中で磁石を動かすと、針金に電流が生じることを発見しました。電流を流すと磁気が生じ、磁石を動かすと電気が生じたのです。この原理の発見によって、発電機が可能になり、人類が電気を自由自在に利用する糸口を作ったのです。

時代は、イギリスで起こった産業革命が、ヨ

ーロツパ諸国に波及する、そのようなタイミングでした。科学の発見は、時を移さず実用化のための技術開発へと引き継がれました。それが成功すると、新しい産業が興り、社会は急速な変貌を遂げつつあつたのです。

代表的な例が、1879 年 10 月 21 日の、アメリカのトーマス・エジソンによる実用炭素電球の発明でした。その時から夜の闇は、電気の光で次第に追いやられていく運命となりました。

ファラデーの電気および磁気現象に対する概念的な質的な説明に対して、量的な数学的な形式を与えようと考えたのが、スコットランド出身のジェームズ・クラーク・マクスウェル (1831-1879) でした。マクスウェルは、最初はロンドン大学の、後にケンブリッジ大学の自然科学の教授でしたが、1864 年に彼が発表した『電磁場の理論』は、ニュートンの運動方程式と並ぶ、人類の頭脳が生んだ最高の業績といわれています。

電気力線と磁力線の考えを使い、それまでに知られていた電磁気についての法則を一連の方程式で書きあらわすことに成功したのです。これが「マクスウェルの方程式」と呼ばれるものです。これらの方程式を数学的に変形して、「波」をあらわす式を得ました。つまり、電磁場の時間的変化は、波になって空間を伝わっていくということでした。電磁場に関した波ということで、この波は「電磁波」と呼ばれることになりました。そして彼は光も電磁波現象を現すことを予言していたのです。

マクスウェルの理論を継承して、電磁波、つまり電波の存在を初めて実証したのは、ドイツの物理学者 H. R. ヘルツで、1888 年のことでした。

しかし電波の応用の歴史は、発明家 G. マルコーニによって開かれました。彼は 20 歳のときに、ヘルツの実験を知り、1895 年には発信、受信の実験に成功したのです。1901 年には早くも大西洋横断の無線電信を行ったのです。

それにしても、あまりにも見事なマクスウェルの理論に感激して、当時のある著名なドイツの物理学者は、ゲーテの『ファウスト』第 2 部から次のような引用をして、大学での講義を始めたということです。

隠された自然の力が我がまわりに姿を現し、
我が心を静かなる喜びで満たしている、
この神秘的な記号を記したのは
神だろうか!

## 陰極線の秘めた謎

1860 年のころ、ボン大学教授のユリアス・プリュッカー (1801-1868) は、ハインリッヒ・ガイスラーという優秀な技師の協力を得て、金属の電極のついたガラスの管を作り、この管を真空にすることに成功しました。そしてこの管の電極に電流を通じると、管の内部で不思議な蛍光が輝いたのです。しかしこの蛍光の正体は、当時は見当もつきませんでした。

さらにミュンスター大学の教授、ヨハン・ウィルヘルム・ヒットルフ (1824-1914) が加わって、3 人は共同で放電管の改良に取り組んだのです。ガラス管をいろいろな形に変え、電極を各種の金属でさまざまな形に作り変え、真空にした管内に微量ガスを封じ込んだりした結果、容易に放電を発生させることが出来るようになったのです。同時代の科学者たちは、陰極から放射される光を「陰極線」と呼ぶようになりました。

イギリスのウィリアム・クルックス(1832-1919)、後のクルックス卿はちょっと変わった人物でした。彼はロンドン郊外の荒廃した、半ば自然に帰ってしまった公園の塀の陰にある、蔦で覆われた家に住んでいました。昔イギリスの田舎ではよくあったことですが、あの男は錬金術師だという噂がたつほどでした。それはともかく、彼は原子番号 81 番のタリウムを発見したり、真空中のいろいろな物理現象の研究を行った科学者で、後に学士院会長など要職を歴任した人物です。

1870 年頃の彼は、光を放つ物質の研究に没頭していました。科学の話のとき、口からついて出る言葉は、いつも「ラディエント・マター (光を放つ物体)」でした。

ドイツでの 3 人の話を聞くに及んで、居ても立ってもいられなくなり、その日から薄暗い研究室で研究を始めました。自分の考案になるガラス管を高価な費用で作らせ、実験を始めたのですが、初めのうちは失敗の連続でした。それでも陰極から直線的に光線が放射して、管内の他の端にあざやかに映ったのです。そこでこの光線にいろいろな形の遮蔽物を当ててみると、反対側のガラスの面に、遮蔽物の形の影がはっきりと映ったのです。

しかし何故よりによって反対側の面に、このように鮮やかに映るのでしょうか。いったいこの光線は何なのか。彼が考えついた実験の方法は、この光線を写真の乾板に記録することでした。クルックスはこの光の撮影を始めたのですが、何も映りませんでした。夜も昼も、暗い実験室で作業を続けました。ガラス管が焦げて破損すると、彼は新しい、もっとよいものを作らせました。それでもたった 1 枚の写真も撮れなかったのです。撮影方法をいくら変えて試しても無駄でした。乾板はすでに感光してしまったように、かぶりを現していたのです。

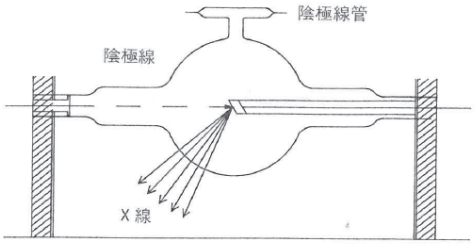


図-2　レントゲンの陰極線実験

乾板を製造している会社にも注文をつけて、厳重に包装された乾板を取り寄せ、今度こそすべての条件を整え実験に着手しました。乾板の入った包みをガラス管の側に用意し、準備万端整えて、予備実験のため電流を流してみました。ガラス管は光を発し、問題はありません。

クルックスは包みの中から新しい乾板を抜き出してカメラに装着しました。そうしてコイルから電流を流すと、放電管は前回と同じように輝きました。もとの暗さに戻ってから、乾板を引き出し、現像し、乾燥させて、初めて明るいところへ持って出たのです。クルックスはこの 1 枚の乾板のために夜通しかかったのです。何ということでしょうか。またしても出来損ないでした。乾板の上には今までよりもはるかに強くかぶりが生じていたのです。さしものクルックスも諦めざるをえませんでした。きっとこの光は、この天地の間で、簡単には解けない謎を秘めているのだと、自らに言い聞かせて。

## とらえた未知の光

1894 年の春、ドイツ南部のマイン河畔にある

ビュルツブルグ大学のウイルヘルム・コンラッド・レントゲン教授(1845-1923)は陰極線の研究に着手しました。彼にとって陰極線は、一連の科学上の過程の検証にほかならなかったのです。

彼は考えました。ほかの科学者たちはどのように実験したのだろうか。彼らはどういう理由で、どのように測定したのだろうか。陰極線がこれまでの実験の結果と同じような現象を現すだけだとすれば、その研究方法を変えなければならないだろう。彼は物理学者としての自分がこれまで行ってきた研究の手順を踏んで、つまり、観察、熟考、仮定、推論、実験、そして証明という順序で始めたのです。

それまでに陰極線の研究に使用されたガラス管にはどんなものがあったか。ガイスラー管、ヒットルフ管、クルックス管、プリュッカー管、これだけだろうか。

レナード管にはアルミニウムの薄板の窓があります。最初にレントゲンが選んだのはこの種のガラス管でした。このアルミニウムの窓から陰極線が放射されることは知られていたのですが、その光を捕らえるために、ガラス管を黒い紙で覆ってみたこともありました。

さらに光線を観察するには、蛍光板を用いる方法があります。蛍光板は光を遮り、それ自体が光るので、見えない光源の存在を知ることが出来るのです。ビュルツブルグ大学の研究所にも蛍光板は幾つもあったのですが、レントゲンが使用したのは、それまでの陰極線の研究者が用いたものではなくて、シアン化白金バリウムを塗った一枚の紙を、厚手のボール紙に張り付けたものでした。

電圧をあげるとコイルはうなり音をあげ、電流を電極に流すと、蛍光板は輝きました。アルミニウムの窓を透過する光が蛍光板を輝かせたのです。この現象はすでに知られていました。しかしその年はそこまででした。教授として講義も試験もあったからです。研究のほうは断続的に行ってはいたのですが、めざましい進展はありませんでした。

1895 年秋、彼は改めてこの不思議な光線の研究に取り組むことにしました。レナード管をガイスラー管に替え、さらにヒットルフ管に替えて実験を進めました。実験は幾夜も続けられました。また、ガラス管の発光を遮るために、管全体を光を通さない黒い包装紙で完全に包み込みました。写真用の乾板は、必ず厚手で良質の黒い紙に包装されていたのですが、これを利用したのです。以前に彼自身が試みた方法でした。

コイルからの高圧電流を電極に流したところ、ガラス管からは一筋の光も漏れては来ませんでした。ところが不思議なことに蛍光板が輝いているではありませんか。レントゲンの注意がそちらに向けられました。

「おかしい！」

目に見える光は全くもれていないのに、電流を流すたびに、蛍光板は光るのです。蛍光板を手に取って、黒紙に覆われたガラス管から遠ざけても、それは消えることはない。だから陰極線ではありえない。電流を切れば蛍光板は光るのをやめる。

レントゲンはこのとき、見えない光が、管から放射して、黒紙を透過していることを、蛍光板の輝きで確認したのでした。

「未知の光だ!」

これまで手がけた様々な放電管の実験の経験から、そう考えざるを得なかったのです。それは、今から 100 年前の 1895 年 11 月 8 日、金曜日の夕方のことでした。

参 考 文 献

1) 古典物理学を創った人々、エミリオ・セグレ著 1992、みすず書房
2) X 線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
3) 大科学者たちの肖像、ロイ・ポーター編、1989、朝日選書
4) 科学の歴史、S. メイスン、1956、岩波書店

---

放射線と産業、No. 68 (1995) 47 - 51 より転載
（全 8 回連載分の第 1 回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第 2 回　世紀の X 線フィーバー*

吉川 秀夫
元日本原子力研究所

### 50 歳までのレントゲン

ウィルヘルム・コンラッド・レントゲンは 1845 年 3 月 27 日に、ドイツ (当時はプロシァ) のライン地方のレネップ市に生まれました。父親は織物工場を経営しながらその商売に励んでいました。母親はオランダのアムステルダム出身のきれい好きで家庭的な女性だったということです。両親は 3 歳になったばかりのウィルヘルムを、母方の祖母の家に預けました。オランダの静かな町で彼の幼年時代は始まったのです。そして少年になったレントゲンは、ライン河畔のユトレヒトの高等学校に学ぶために、親戚の大学教授の家に預けられました。

ところが卒業間近の教師とのトラブルが原因で、高等学校の卒業証書がもらえなかった彼は、大学への道が閉ざされてしまいました。そこでユトレヒトを離れて地方の工業学校へ行くことになったのですが、そこでは彼の知識欲を満足させることはできませんでした。悩んだ末、彼はスイスのチューリッヒ工業大学へ転学したのです。スイスは彼をのびのびと開放しました。豊かな自然を楽しみながら、勉強の方も決しておろそかにはしませんでした。

チューリッヒ大学では、アウグスト・クント教授から、特に大きな影響を受けました。物理を専攻することに決めたのも、彼の勧めによるものでした。このクント教授の下で学士試験に合格し、さらに 1869 年 6 月には博士号を取得することができました。顔一面に薄くひげさえ生やして、堂々たる風采のドクトルが誕生したのです。24 歳でした。その頃チューリッヒ出身のアナ・ベルタという名の 6 歳年上の女性に出会い、将来を約束することになったのです。

その後クント教授が、ドイツ南部のビュルツブルグ大学から招へいを受け、移ることになったとき、レントゲンは助手として行動を共にします。そこで『空気の比熱について』という論文を書き、これが学会誌に掲載された、彼の初めてのものとなったのです。

しかしビュルツブルグ大学は、クント教授の推薦にもかかわらず、教授資格の授与を拒否したのです。高等学校の卒業証書を持っていないような者には、大学教授の資格は与えられないという理由でした。レントゲンが悩んだのも無理はありません。そして科学の研究で実績をあげるしかないと、一層の努力を決意した時期でもありました。

その頃、ドイツ領に編入されたストラスブールに新しい大学が設立されると、クント教授に従って新婚のレントゲンもそこへ移りました。1876 年には助教授となることができました。

その後ギーセン大学の教授を経て、1887 年に

ウィルヘルム・コンラッド・レントゲン

ビュルツブルグ大学に教授として着任しました。奇妙な巡り合わせで、かつては拒否された大学に、16年ぶりに招かれて戻ってきたのです。40歳を過ぎたばかりのレントゲンは、研究実績でも一流科学者の仲間入りをして、気力が最も充実していたときです。彼はこの大学の物理研究所をドイツ一の大学付属研究所にしようという意気込みだったのです。

そして、1895年12月、彼はこの大学に来てから、すでに15編の論文を発表していました。50歳のときです。

## 7週間の勝負

陰極線管からの見えない放射線を、陰極線ではなくて、これが物質を透過する新種の放射線であることを確信した日から、レントゲンはその解明に没頭することになりました。証明を確かなものにするためには写真に写すしかない。以前クルックスが、同様な実験で乾板を感光させてしまった失敗を、繰り返すことはありませんでした。見えない放射線の特質を見抜いていたからです。

彼は身の回りにある様々なものを撮影しました。写真は入れ物を透過してその中のものを浮かび上がらせていました。レントゲンは食事を研究室に運ばせることにしました。そのうち折りたたみ式の寝台まで運び込まれました。大学の教授でしかも物理研究所の所長が、研究所の自室で夜を明かすとは! しかし実験を続けるうちに、この放射線は普通の可視光線では全く影響されないことが分かつたのです。実験は夜を待たなくても昼間出来るようになって、徹夜をする必要がなくなったのは、レントゲンにとって救いでした。

学生をはじめ大学の関係者たちは、レントゲンが何をしているのか大いに気を引かれたところですが、誰にも分からなかったのです。ベルタ夫人も研究の内容は教えてもらえませんでした。

12月も残り少なくなったある日、夫人が研究室に昼食を届けに来たとき、レントゲンは彼女の手を乾板に押しつけて、放射線で撮影しておいたのです。このときの薬指に指輪をはめた骨格の写真が後世に残って、教科書にまで載るようになるとは全く想像もつかなかったでしょう。

レントゲンはそれまでの研究の成果を、17の項目について整理し、簡明なしかも否定の余地のない文章で記述し、報告書にまとめました。このためにほとんど7週間をかけたのです。論文は次のような書き出しでした。

## 新しい型の放射線について

1) 大きなリュンコルフコイルの放電を、ヒットルフの真空管あるいは十分に排気されたレナード管、クルックス管または類似の装置を通しておこし、管を薄い黒紙で隙間なく包装する。完全に暗くした部屋の中で白金シアン化バリウムを塗った紙をスクリーンを装置の付近に持っていくと、放電のたびごとにスクリーンの塗装面が放電装置に面するか否かに関係なく、スクリーンが明るく発光し、蛍光を発する。蛍光は装置から2メートル離れたところでもなお認められる。」

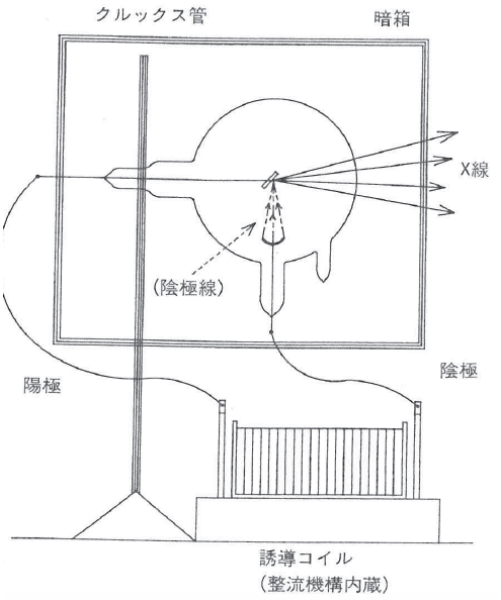
彼はこの放射線の名称について、論文の第3項の、注記2) に控えめながらはっきりと、次のように記しています。

2) 簡単のために、“放射線"なる言葉、そして特に、他の線と区別するために“X線"という名前を用いたい。

レントゲンはこの論文の中で、X線の透過率と密度の関係、プリズム屈折、空気中での吸収、磁場による影響、などなどを明らかにしました。その時点で考えられることは、特別な課題を除いて、すべてやり終えたのです。

大学はクリスマス休暇に入っていて、学生や教授たちは、構内には見かけなくなっていました。1895年12月28日、 レントゲンはこの報告書を地元の物理医学会に提出しました。通常ですと学会の会議の席上で報告しなければならないのですが、なにしろクリスマス休暇中なので、次の会議の開催を待たなければならなかったのです。しかし報告書は大至急で刷り上がり

ました。これが世界中に興奮の渦を巻き起こす




ことになるのです。

## 疾風と怒濤が

年が明けて 1896 年の 1 月 1 日、レントゲンはこの刷り上がった論文を、各地の著名な物理学者宛に発送しました。その中には、数葉の写真を添えて旧友のウイーン大学の教授に送ったものもありました。受け取った旧友は飛び上がらんばかりに驚きました。何かやるだろうと思っていたレントゲンが、人体を透視する写真をとったとは!

その夜の会合で、送られてきた X 線写真が披露されました。これを手に入れたウイーン新聞が、翌 1 月 5 日、 日曜日の朝の新聞で派手に報じたのです。新聞の編集長は、この科学上の発見の重大さを、ジャーナリストの鋭い感覚で見抜いていたのです。

2 日後に同じ記事がフランクフルト新聞に掲載されました。すると堰を切ったように、 ドイツ中の新聞が一斉に報道しました。1 月 6 日付でロンドンのスタンダード紙が、この記事を全世界の通信社に電信で送り、世界中にレントゲンの名が知れ渡りました。そして一番遅れて、地元ビュルツブルグの新聞が 1 月 9 日付でこの大発見の第一報を記事にしたのです。

そのときはもう、物理学上の研究の意義などはどこかに失われてしまって、「万物を透過する放射線」は、医学はまだよいとしても、軍事にも政治にも、はたまた男女の恋愛問題にまで、X 線をからめた話になってしまったのです。

研究所ばかりではなく、電源とコイルと真空管のあるところでは、すぐさま X 線写真の撮影を始めました。レントゲンの最初の論文が発表されてから一ヵ月のうちに、早くも数百枚の写真が写されたということです。

ビュルツブルグの物理医学会では1月23日に臨時講演会を開催する予定でした。ところがそれに先立って、あまりの評判に、ときのドイツ皇帝が 13 日に御前講演を命じたほどでした。

23 日、物理学研究所の講堂はりっすいの余地もないほどの聴衆で埋まりました。教授団、高級将校、市当局の幹部、学生、等々。

レントゲンが登場すると、熱狂的な拍手が起こり、そして固唾をのむかのように静まり返りました。彼はあくまでも謙虚でした。その時の情景を、後にドイツで刊行された『伝記レントゲン』は、次のように記しています。

> 「彼は、研究は今なお継続中、と報告した。彼はヒットルフ、ヘルツを初めとし幾多の開拓者の名をあげた。彼はこの発見を偶然と称した。そうしてシアン化白金バリウム蛍光板が、どのようにして蛍光を発するに至ったかを述べ、ガラス管を黒紙で包装したのは、全くの偶然である、と報告した。割れるような拍手が何度も起こった。」

レントゲンは X 線写真を回覧に供しながら、講演を終えました。次に彼は、誰か実験台になってくれる人を呼びかけました。応じたのが著名な解剖学者、フォン・ケリカー枢密顧問官閣下だったのです。手の X 線写真が撮られ、写真はすぐに現像され、回覧されました。骨がはっきりと見えていたのです。

新しい感動の波が納まった頃、フォン・ケリカー閣下は深い感動を面に表して登壇しました。そしてレントゲンの講演に深い感動を覚えたこと、この発見が自然科学および医学に対して、きわめて広範な意義を有することを確信すると、

発言しました。満場の聴衆はもちろんこれに拍手で同意を表しました。ケリカー閣下はさらに続けました。

「X 線を今後レントゲン線と命名することを提案する!」

研究所には、新聞記者やカメラマンが、この大発見をした教授に会って会見記を取りたいと張り込んでいました。しかし成功したのは、ほんのわずかな数人で、談話も数語でおわってしまいました。

「あなたは初めて X 線を観察されたとき、何を考えましたか?」
「何も考えなかった。ただ探求しただけです」

特許の問題にも、彼は自分の信念を貫きました。ドイツで最大の電気会社である AEG 社が、レントゲンの発明の特許を譲ってくれと申し出たことがありました。科学者としての彼の回答は明瞭でした。

「私は特許権なぞ得たいと思いませんし、また必要でもありません。私は X 線を発明したのではありません。X 線はそれを使用する方々のものです」
「私はX線にはまだまだ研究の余地が多分にあると信じています。私は決して自分の研究を独占するものではありません」

## 世界中を沸かせて

世界中の科学者や技術者たちが、およそ考えうる限りのあらゆる方法で、レントゲン線の研究に取りかかっていました。もちろんレントゲン自身も、講演や実演をなるべく断って、研究を進めていたのです。

3 月 9 日、最初の研究論文の続編、『新しい型の放射線について 第 2 報』を提出しました。つまり第 1 報の 17 項目に引き続いて、第 18 項目から 21 項目までを、補足した形になっています。

「できるだけ強い X 線を作り出すには、白金が一番適している。この数週間、私はアルミニウムの凹面鏡が陰極として働き、鏡軸と 45 度に傾斜し、鏡に曲率中心におかれている白金板を陽極として放電管を用いて成功した。」

第 20 項にあるこの文章は、その後レントゲン管製作にきわめて重大な影響を与え、金科玉条のように崇められたのでした。

イギリスでは、ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所の教授であつた J. J.トムソン (1856-1940) がいち早く反応をしました。彼は 1880 年にケンブリッジ大学を卒業して以来、研究の対象としていた希薄な気体中での放電の問題で、1890 年代半ばにはイギリスを代表する権威になっていました。したがって、レントゲンが X 線の発見を報告した 1896 年初頭には、この新しい研究に着手する用意は十分にできていたし、実際に彼の対応は素早いものでした。

1 月 27 日にはトムソンは、X 線についての最初の論文を発表し、この中で電磁波と X 線の関係について考察をしています。 2 月から 4 月にかけてトムソンはキャベンディッシュ研究所の若い研究生を動員して研究を展開し、次々と重要な論文を発表したのです。

彼はまた理論的な考察から、X 線は波長の非常に短い電磁波である可能性を示唆し、同時に X 線を生み出すもとになる陰極線の本質についても興味を持つようになりました。これが翌年の「電子」の発見につながるのです。

アメリカではどうだったのでしょうか。X 線発見のニュースが伝わると、ハーバード大学の物理学研究所のグループは、96 年 1 月末には X 線写真の撮影に成功しました。また陰極線管の寿命を延ばすための実践的な方法を見つけ出してもいました。

またジョンズ・ホプキンズ大学の物理学研究所のグループは、レントゲン発見のニュースがボルチモアに届くと、すぐさま実験に着手、数週間の試行の結果、2 月 4 日に X 線写真の撮影に成功しました。

しかし一番早かったのは、研究施設が一番貧

弱な研究所にいたコロンビア大学のミッチェル・ピュービン (1858-1935) かも知れません。すでに電気放電の研究を手がけていたピュービンは、X 線の報道がニューヨークに届いたとき、レントゲンの実験の追試にすぐに成功していたらしいのです。彼はX 線の照射を受けた物体からもX 線が発生するという、いわゆる 2 次 X 線の発見で知られるようになりました。

さて、極東の島国の日本にはどのような伝わり方をしたのでしょうか。当時ベルリンに留学していた長岡半太郎(1865-1950)から、X 線の発見が伝えられると、いち早く帝国大学 (後の東京帝国大学) 理科大学において山川健次郎教授、鶴田賢次助教授が、明治 29 年 (1896 年) 3 月中旬から実験を開始しました。

同じ頃第一高等学校でも水野敏之丞教授、山口鋭之助教授も実験を開始、身近な道具や小さな生き物のX線透過写真の撮影に成功しています。この成果はX線研究の簡単な解説を添えて、X 線写真 16 葉を含む 25 頁の小冊子に、第一高等学校蔵版『れんとげん投影写真帳』と題して 5 月 15 日に日本橋の丸善から出版されました。

一方京都においても、第三高等学校の村岡範為馳教授が、かつてストラスブール大学のクント教授の下に留学していたこともあって、レントゲンと親しかったので、直ちにX 線の実験に着手しました。最初の撮影は島津製作所の本社の実験室で行われたということです。

そして同年 7 月 9 日に京都府教育会で講演をし、X 線写真を示しています。これは『レントゲン氏 X 線の話』として小冊子にまとめられ、8 月 31 日に京都市の書店から発行されました。これがわが国における放射線に関する最初の教科書ともいわれます。

それにしても何と素早い反応でしょうか。ちょうど 100 年前の日本の科学の、欧米に決して引けを取らない水準に、本当に驚くばかりです。

参 考 文 献


1) X 線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 放射能、物理学史研究刊行会編、1970、東海大学出版会
3) レントゲン、清水栄著、1995、京都フォーラム


---


*放射線と産業、No. 69 (1996) 47 - 51 より転載
（全 8 回連載分の第 2 回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第 3 回　ウランとその放射線の発見*

吉川 秀夫
元日本原子力研究所

### 天に地にウラン

1781 年に、ドイツ生まれのイギリスの天文学者ウイリアム・ハーシェル (1738-1822) は新惑星を発見して、科学界に大センセーションを巻き起こしました。これは歴史時代に入ってから最初の惑星の発見だったからです。

当時は、望遠鏡の発見以来すでに 150 年を経ており、天文学は大層な進歩を遂げていました。それに 22 年ほど前の 1758 年には、ハレー彗星が予言通りに戻ってきて、地球に接近するなどの出来事がありました。それに太陽系でも、木星の衛星 4 個、土星の衛星 4 個が発見されるというほど、観測技術が高い水準にまで達してはいたのですが、それらは主星ではなく、あくまでも衛星にすぎなかったのです。

それにひきかえ、ハーシェルが発見した星は、地球と兄弟分の同じ惑星だったのです。太陽のまわりを、太陽から一番外側にあると思われていた土星までの距離の、2 倍のところを回っているというものです。

この太陽から 7 番目に位置する新惑星は、ギリシャ神話の天の神のウラーノスに因んで、ウラノス (天王星) と名づけられました。ギリシャ神話の神々の系図にしたがって、軌道の内側から祖父 (木星)、父(土星)、息子 (天王星) と並ぶことになったのです。まことに筋の通った命名ではありませんか。

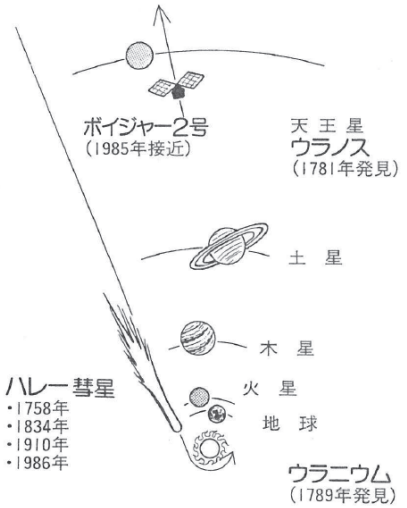
発見者のハーシェルは、音楽の才能に恵まれ、イギリスでオルガン奏者として有名になり、若いうちは音楽教師として生計を立てていました。その後、彼は天文学に興味をひかれ、実際に天体を眺めたいという望みから、自分でレンズを磨いて望遠鏡を制作する決心をするのです。当時、望遠鏡はものすごく高価で、彼にはそれを購入するほどの余裕がなかったからです。いかにもドイツの教養人らしい考え方ではありませんか。

ドイツから呼び寄せた妹のカロリーネが、このレンズ磨きに献身的な助力をして、当時としては最高の性能の望遠鏡を完成したのでした。彼女自身も 8 個の彗星を発見するなど、最初の女性天文学者として語り継がれています。

ハーシェルが発見してから 200 年がたった 1985 年の終わりごろに、その 9 年も前にアメリカが打ち上げた宇宙探査機ボイジャー2 号は、天王星に接近してその写真を送ってきました。あまりにも遠く離れて、太陽の光も少ない薄暗い宇宙空間に、天王星は青みがかった天体として確かに存在したのでした。

18 世紀の末になって、そろそろ新しい惑星の発見の興奮も忘れられたころ、 ドイツでは、化学者 M. H. クラプロート (1743-1817) が新しい元素を発見し、星の名前に因んで、その名前をつけたのです。ウランがそれでした。

彼は 8 歳のとき生家が火災にあって貧乏し、16 歳のとき、薬種屋へ奉公にやられたのでした。



当時の薬種屋は、化学の研究には最適の職場でしたから、彼はそこで実験技術者として成長し、研究を積んで化学者として名をあげたのです。

また彼は、近代化学の基礎を築いたフランスの化学者アントワーヌ・ラボアジェ(1743-1794)の、新理論の支持者でもありました。 ドイツの古典的な理論によって立つ化学者達が、ラボアジェがとなえた新しい化学理論に、あげて反対していた当時としては、これは大変なことでした。

理論の面ばかりではありません。いくつもの新元素の発見で、彼は名を残しました。なかでも最初の発見が、もっとも重要なものとなりました。1789 年にピッチブレンドとよばれる重たい鉱石を処理して、黄色の物質を手に入れたのです。実際には化合物だったのですが、クラプロートは、それを当時未発見の金属元素だと思い込んで、古代錬金術者の命名法にしたがって、惑星の名をつけることにしたのです。ハーシェルが 8 年前に発見した新惑星ウラノス (天王星)にちなんで、新しい元素をウランとしたのです。

クラプロートは、当時のドイツでは、分析化学の第一人者として評価されていたのでしょう。1810 年、ベルリン大学の設立に際しては、67 歳にもかかわらず、化学教授に任ぜられ、その死に至るまでの 7 年の間、職責を果たしたのでした。彼自身はもちろん、同時代の人々は 20 世紀になってこの重い元素が、人類社会に重要な役害」を果たすようになるとは、予想だにしなかったことでしょう。

## 燐光の正体

天王星が発見されるよりもはるかな昔、つまりギリシャ時代に、人々は『明けの明星』のことを「フォスフォラス (光をもたらすもの)」という言葉で呼んでいました。金星が太陽より西にあるとき、日没のときは金星は沈んでしまって見えません。しかし翌日の明け方には金星の方が太陽よりも早く地平線からのぼり、日の出前のしばらくの間、東の空で明るく輝きます。太陽の光を運ぶという意味を込めて、そう呼んだのでした。

その後この言葉はすたれてしまって、ローマ時代には、金星は「ビーナス」と呼ばれるようになったのでした。『宵の明星』と『明けの明星』が同じ金星であるということがわかって、名前が変わったという、興味ある例のひとつです。

ギリシャ時代の古い言葉が復活したのは、17 世紀になってからです。1674 年にドイツの科学者 H. ブランド (1630-1692?) が、全くのところ錬金術師的なやり方で、新しい物質を発見しました。大量の尿を煮詰めて、白いろう状の残留物を取り出し、それをさらに精製して純度の高い物質を得たのです。

この新しい物質は、暗闇の中で緑色に輝いたのです。それは他から光を受けなくても発光し、その光は長時間持続します。ろくな灯もない当時の夜の世界は、本当に漆黒の闇だったに違いありません。その闇の中でゆらめきながら光る物質は、さぞかし人々の関心を集めたことでしょう。

彼はその物質に「フォスフォラス(燐)」という名前をつけたのです。ウランが発見される 115 年も前のことです。

彼は「最後の錬金術者」と言われたこともあるように、他の金属を金に換える触媒物質、いわゆる「賢者の石」を探していたのだといわれています。それが結果として燐を発見することになったのでした。しかしどうして光るのかは、彼には解明できなかったのです。

物質が外部からの光。熱・X 線・紫外線・赤外線などを受けて光を発する現象を、ルミネセンスといいます。これは「光になる」という意味のラテン語に由来します。その中には、光の放出が遅れることがあり、エネルギー源が切れた後も、光の放出が続きます。この残光をもつルミネセンスを、「燐光」といいます。そして残光のないルミネセンスを「蛍光」というのです 。闇の中で輝く鉱物は、現在では色々と知られていますが、燐光現象とはいっても、燐と関係があるわけではありません。燐光は鉱物に光を当てた後に起きる現象ですが、闇の中で見える光は時間が経つと消えてしまいます。

ところが燐は光を当てなくても発光し、その光は長時間持続するのです。この燐の発光は、その 220 年後にキュリー夫妻が苦心して抽出・

分離したラジウムの発光と同じように、その時代の科学者達の関心を呼ぶことになりました。

もちろんこの二つの光は同じ種類のものではありません。燐は徐々に酸化して、その際に生成する化学エネルギーを光に変換するものです 。一方ラジウムは原子核の崩壊による核エネルギーの一部を光に変換することによるものです。

燐の発見から 2 世紀、ウランの発見から 1 世紀が過ぎて、レントゲンの X 線発見のニュースは、世界中の科学者を興奮の嵐に巻き込みました。フランスでも例外ではありません。

アンリ・ベクレル (1852-1908) は、自分の専門の分野でも、X 線を放射するものがあるのではないかと考えました。彼は燐光や蛍光を研究の対象としていたのです。クルックス管の燐光壁から発生する放射線、つまり燐光と X 線の関連から、どんな燐光物質でもこのような放射線を放出するのかどうか。1896 年 1 月、彼は早速それを確かめる実験に着手したのです。

実験結果は、彼の考えたようにはならなかったのです。燐光物質や蛍光物質をいろいろ試してみたのですが、X 線は出ていませんでした。しかしこの実験の最中に、思いもかけなかった現象に出くわしたのです。

## ウランから放射線が

ベクレルの実験室にはウラン塩 (ウランとカリウムの硫酸複塩) がありました。それは太陽の光にさらされると、暗がりの中でごく短時間だけ発光します。ウラン塩の燐光はすでに確認されていたのです。

また、黒い厚紙で覆った写真乾板を、日光に曝したことがありました。現像すると当然ながら写真乾板は白いままです。つまりその状態では感光しない、完全に遮光されていることがわかっていました。

そこで、写真乾板を黒い紙で覆い、その上にウラン塩の薄い層状の結晶をのせ、それを日光に数時間曝してみました。その後現像された写真乾板には、包装紙にのせた試験片の影が写し出されていました。

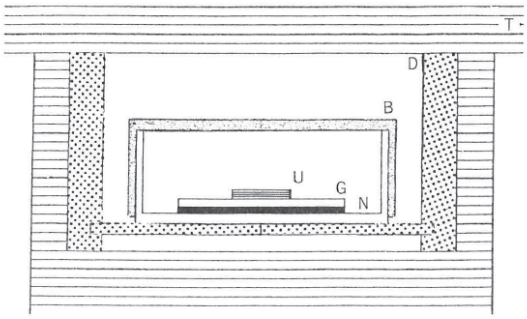
この実験からベクレルは、日光がウラン塩に作用してある種の放射線を発生させ、それが包装紙を貫通し、写真乾板の感光乳剤を黒化させたのだと考えたのです。その限りでは X 線が出ているようにも見えたのです。

さらに実験を進めました。1896 年 2 月 26 日と 27 日、ベクレルは包装紙で覆った写真乾板の上にウラン塩の薄片をのせて、それが日光に曝されるのを待ちました。その頃パリでは、太陽はほんの断続的にしか姿を現しませんでした。そこであきらめて、ウランと乾板の一式を机の引き出しの中にしまいこんだのでした。

3 月 1 日、それでもその写真乾板を現像してみたのです。するとウラン塩の試験片の影が黒々と現れていたのです。日光の助けを借りなくても、写真乾板は、ウラン塩から放出されている何物かによって、感光するということでした。

次の段階は、この実験を最初から最後まで真っ暗なところで行うことです。暗室の暗箱の中に 5 時間、ウラン塩と一緒に放置された写真乾板は、このときもまた黒く感光したのでした。ウラン塩はそれ自体が、黒い包装紙を通過し写真乾板に作用する、ある種の放射線を発生していると、ベクレルは結論しました。

ベクレルは一連の実験結果を、フランス科学アカデミーで報告したのです。レントゲンが X



1896年３月　ベクレルの新しい実験

線の発見を明らかにした場合とは違って、段階を追っての発表でした。

2 月 24 日アカデミーで発表された『燐光によって発せられる放射について』という第 1 の覚書から発展して、3 月の例会で発表された『燐光体によって発せられる不可視光線について』という第 2 の覚書では、

「これらの放射線がレナルト氏およびレントゲン氏によって研究された放射線によって生ずる効果と極めて類似した効果をもち、継続時間が燐光体から放出される光の放射より無限に長い。」

と記して、放射線の可能性を指摘しています。さらに数力月後に発表された第 3 の覚書『金属ウランからの新放射線の放出』では、次のように結論しました。

「私が調べたウラン塩は、それが光によって燐光を発するかいなか、結晶か、 熔融物か、溶液かにかかわらず、すべて同じような結果を与えた。そこで私は、 この効果はこれらの塩の中にウラン元素が存在するということによるものであって、その金属はその化合物よりも強い効果を与える、と考えるようになった」

放射線の源はウラン元素そのものであること、この放射線の強度はサンプルが同一ならば、時がたっても減衰しないこと、その放射線には反射・屈折の性質があるので X 線とは異なることも、明らかにしました。

しかしベクレルによるウランの放射線の発見は、少数の物理学者が関心を寄せたことを例外とすれは、直ちに大方の注目を集めるということにはならなかった、ということです。ひとつには、X 線が人体を透視するという魔術性を持って登場したのに対し、ベクレル線の登場があくまでも地味だったことによります。

それにしても X 線フィーバーは、1896 年の終わりを過ぎてもとどまるところを知らないような有様でした。それに加えてベクレル線の出現です。新しい世紀を目前にして、科学界は湧き返っていました。

しかしレントゲン線もベクレル線も、別名で X 線と呼ぼうとウラン線と呼ぼうと、正体はまだ解明されないままでした。発見の起点になった陰極線ですら、まだその正体の正確なことはわからないままだったのです。

その様子は、同じ年に発表された、 ドイツ近代詩の先駆者 H. ホフマンタールの『世界の秘密』と題する詩の一節が、そっくりそのまま当てはまるようでした。

しんそこ理解はされないまま、
片言に真似られる呪文のように、
それはいま口から口へとわたりゆく。

深い泉はそれをよく知っている、
泉に身をかがめ、一人の男がそれをとらえ、
とらえてまたそれを失くした。

## 発見における偶然

レントゲンが X 線を発生させた最初の科学者でないのは確かです。クルックスや他の陰極線の研究者達の実験では、X 線が必ず発生していたはずでした。彼らは、黒い包装紙に包んだまま、陰極線管の側に置いた写真乾板に、原因が分からないかぶりが生じたり、何度も乾板を感光させてしまった経験をしていたからです。

しかし彼らのだれ一人として、新しい状況が生じていることを認め、それを追求するという熱意を持ち合わせていなかったのでした。レン

トゲンの価値のある発見は、何か異常なことが生じているのを認め、それが新しい結果であると確信できるまで、注意深く追求したことでした。

レントゲンがはじめて学会の席上でX線の報告を行ったとき、謙虚な彼は繰り返し「偶然」という言葉でそのいきさつを説明しました。確かにその発見には「偶然」という幸運が含まれてはいたでしょう。しかしレントゲンにその瞬間を用意したのは、彼の生涯の習慣であった注意深さ、そして何ひとつ前例のない領域での自然現象を調べようとした彼の前向きの気性でした。

さて、ベクレルの場合はどうだったでしょうか。日光に曝されていない写真乾板を、現像したのは「偶然」ではありませんでした。微かな手がかりをも見逃さないようにという、探求心の帰結であったでしょう。ウラン塩からの放射線が「予想外の現象であり、重要だと思われる」と第2の覚書に記していますが、それが科学者の発見に対する基本的な姿勢と言えないでしょうか。

燐光と蛍光に寄せる関心は、物理学者一族としての、ベクレル家代々の伝統でした。アンリ・ベクレルの祖父のアントワーヌ・ベクレル、父親のエドモン・ベクレル、つまり彼にいたる3代にわたった著名な物理学者の一家でした。そのようなわけで、1828年から1908年までの80年間というもの、アカデミーには必ず1人、時には2人のベクレルが名を連ねていました。

レントゲンの発見が知られるようになったとき、アンリはすでに自然博物館で父の職を受け継いでおり、また当時すでに創立100年になるエコール・ポリテクニク (高等理工科学校) の教授にも名を連ねて、燐光と蛍光に関するいくつかの論文を発表していました。

1896年1月20日の科学アカデミーの例会で、数学者のアンリ・ポアンカレは、ビュルツブルグ大学のレントゲン教授から送られた初めてのX線写真を、出席者に見せました。

話を聞いていたアンリ・ベクレルが、放電管のどの辺からその放射線が出てくるのかと尋ねると、ポアンカレは陰極の反対側の、ガラスが蛍光を発するあたりらしいと答えたのです。そう聞いた途端にアンリには、X線と蛍光や燐光の間には何か関係があるのではないか、という考えが浮かんだのは間違いないでしょう。そうして早速その翌日から、一連の実験に取りかかったのでした。

実験の材料に使ったウラン塩は、以前にアンリの父エドモンが研究の対象にしていたものでした。とくにウランの燐光の強度と持続時間の測定は、エドモンの研究の成果でした。アンリの実験は、それから2~3週間のうちに、新しい放射線の発見に導くことになったのです。

発見が偶然に行われる場合、あるいは偶然に行われたように理解される場合、どちらにしても微かな暗示を受けて立つ用意のよさが、成否の鍵を握るものです。レントゲン線にしてもベクレル線にしても、まさにその典型というべきではありませんか。

アンリ・ベクレルは、「この発見は彼の父と祖父の手柄とすべきだ」といったと伝えられています。祖父伝来の研究室で、60年間にわたって続いた研究が、結局のところ、しかるべき時期に、しかるべき成果を生み出した、というべきです。歴史のない科学は存在しないのですから。

参 考 文 献

1) X線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 放射能、物理学史研究刊行会編、1970、東海大学出版会
3) 誤りの相対性、アイザック・アシモフ著、1989、地人書館
4) 科学の運、アレクサンダー・コーン著、1990、工作舎

---

*放射線と産業、No. 70 (1996) 45 - 49 より転載
（全8回連載分の第3回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第 4 回　電子をとらえた*

吉川 秀夫
元日本原子力研究所

### 様々な電気現象から

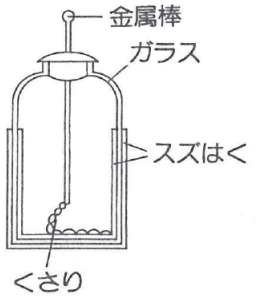
妖しい光を放つ放電現象は古くから知られていました。その中でも強烈な光と音をもたらすものは、あの稲妻でした。稲妻の正体が電気の流れであることは、1752 年のベンジャミン・フランクリン (1706-1790) による有名な「凧による雷の実験」で検証されました。

フランクリンはボストンの貧しい家庭に生まれ、ろくに学校へ通うこともなく、子供のときから働き続けなければなりませんでした。印刷工、郵便局員、議会の書記と職業を変えましたが、科学の大好きな勤勉家でした。

フランクリンが電気の研究に夢中になるきっかけは、1743 年のあるとき、スコットランドから来ていた大学教授の行なった、「ライデンびん」による放電の実験を目撃したことからだといわれています。

そして熱心に研究を進めたフランクリンは、電気はただ 1 種類の流体で、その流体が余分にあるか欠乏しているかによって、「引き合う」か「反発する」かの現象が生ずるのだと考えました。もちろん現代科学の水準のような正確さではありませんが、彼は電気に関する「プラス=正」、「マイナス=負」あるいは「電荷」という用語を残しています。

フランクリンの研究報告は本にまとめられ、10 版を重ねたということです。そして各国の言葉に翻訳されて、ヨーロッパの科学界では、植民地の科学者として彼の名を知らない者はいないというほど、有名になっていました。



ライデンびん

1776 年、アメリカ独立戦争が始まると、フランクリンはフランス駐在の大使として重要な役割を果たしました。彼の科学者としての名声が、独立をめざすアメリカの 13 州植民地に、大きな利益をもたらしたのでした。

稲妻が巨大な放電現象と知られるようになっても、それはたまにしか起きないし、思い通りに制御できるわけもないので、実際は電気の本質を探る研究には役立たなかったのは当然です。

しかし 18 世紀になると、ガラス管の中の放電現象が、実験室で研究の対象になっていました。初期の実験は、ガラスの容器の中の空気をポンプで引いて希薄な状態にし、この容器を摩擦電気による電源に接続するというやり方でした。すると容器の中に奇妙な光が発生したのです。この光に興味を持った科学者たちは、ガラス管の形にさまざまな工夫をこらして、その発光の

観察を続けたのでした。

この光の本質については、当時は全くわかりませんでした。今日では、電流がひきおこす 2 次現象であることが判っていて、次のように説明されています。

「気体中を電流が流れるとき、電流を構成している電子は、気体の原子と衝突してその原子を励起する。電子のほうはエネルギーの一部を失うが、この励起された原子がもとの状態に戻るときに、こうした光を放つ。」

この原理を利用したのが、今日の蛍光灯でありネオンサインであることは、いうまでもありません。

しかし電気の正体を明らかにしたのは、この蛍光の研究ではなかったのです。ガラス管の中の気体をほぼ完全に取り除き、真空に等しい状態をつくりだして、電気の流れをじかに観察することができるようになって、それが可能になったのでした。

1855 年、H. ガイスラー (1815-1879) が、水銀柱をピストンとして使ったポンプを発見しました。このガイスラーのポンプを使うと、ガラス管の中の空気を 100 分の 1 気圧まで減らすことができるようになったのです。従来の空気ポンプのときより、一桁も性能が上がったというわけです。

この新型ポンプを使って、最初に放電管の実験を行なったのは、ボン大学の教授、 J. プリュッカーでした。1858 年のことです。ガラス管の中の陰極に電流を流し、空気を除いていくと管の大部分で蛍光が消えてしまうのですが、陰極の近くのガラス管の壁面に緑色の光 (グロー) が現れるのを発見したのです。

それは陰極から何か見えない放射線が出て、真空中を飛び、それがガラス管に当たって光を発しているように見えました。その放射線が陰極線と名づけられたのはその数年後のことでした。

多くの科学者が競って陰極線の研究に取り組みました。レントゲンもその一人で彼は研究を発展させ、ついにはX線の発見に至った経緯は、

すでにお話した通りです。

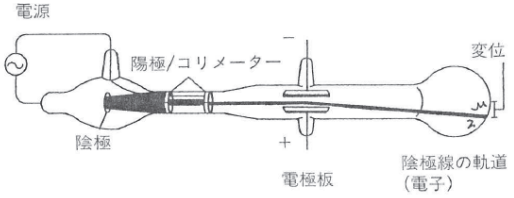
## 陰極線の正体は

1890 年代のはじめ、当時すでにケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所長となっていたトムソンは、陰極線の研究に取りかかりました。 しかし 1896 年頃まで、日立った成果があつたとはいえません。

1896 年初めには、レントゲンの X 線発見の大ニュースが飛び込んできました。その衝撃の大きさから、追試をしなければとても信じられませんでしたし、また X 線そのものの解明も出来ていなかったことから、トムソンは早速実験に着手しました。そして 1896 年の半ばまでに、相次いで X 線関連の論文を発表しています。

1897 年になってトムソンは、X 線の研究を踏み台にして、再び陰極線そのものの解明に向かっていました。そしてまず、この目に見えない陰極線を、プラスとマイナスに帯電した電極の間に通すと、ガラス管の光る位置がずれる、つまり陰極線が曲がることを発見しました 。

この実験はすでにほかの科学者によって試み




J・J・トムソンが実験に使った陰極線管

られていたのですが、条件が悪くてそのような結果は得られていなかったのです。トムソンが成功した理由は、高性能の真空ポンプが使えるようになって、管の中の圧力を十分に下げることができるようになり、残存気体分子の効果を無視できるようになったからです 。

トムソンは陰極線の電極による方向変化が、電極のマイナス極板から遠ざかり、プラスの電極方向であることを見出しています。このようにして放電管の中を流れる陰極線の正体は、光のような波動ではなくて、マイナスの電気を持つ粒子の流れであるということを明らかにしたのです。

トムソンは続いて、電気や磁気によって陰極線がどのくらい進行方向を曲げるのかを測定したのです。そして得意の数学的な思考を働かせて、「陰極線粒子の速度と電荷の比」と 「陰極線粒子の速度と質量の比」という重要な値を決定することが出来たのでした。これによって陰極線粒子の質量は、水素原子の質量よりもはるかに小さいものであることを明らかにしました。現在ではそれは 1/1837 とされています。

とにかく陰極線粒子は原子に比較して、きわめて小さいものであり、これ以上小さなものはないと考えられていた原子の世界に、さらに小さな粒子の世界がトムソンによって拓かれたのです。

このようにして、陰極線粒子は電流の構成単位として認められるようになったのです。19 世紀末の科学者たちをあれほど悩ませた陰極線は、今日私たちは電子の流れであることを知っています。そして同時代の科学者たちを魅了してやまなかった、ガラス管上に現れる緑色の光 (グロー) は、次のように説明されています 。

「電子は電気的な反発作用によって陰極から放射され、真空の管の中を慣性で進み、最後にガラス管の壁と衝突して、その構成原子にエネルギーを与える。すると、エネルギーをもらった原子は可視光を放つ。」

トムソンは彼の発見した粒子に、特別な名前を用いませんでした。6 年ほど前の 1891 年にアイルランドの物理学者 G. J. ストーニーが、仮説としての電流の最小単位に、「エレクトロン」という名称を提唱していました。

1897 年のトムソンの実験から数年たつと、この電荷をもった極小の粒子が実存するという考えは、広く受け入れられるようになり、どの国の物理学者もトムソンの発見した粒子を「電子」と呼ぶようになったのです。

## 基本粒子としての電子

トムソンは 1856 年 12 月 18 日にマンチェスター近郊のチーザムホールに生まれました。14 歳のときにマンチェスター大学にはいって工学を学んだのですが、その後物理が好きになり、1876 年に奨学金を得てケンブリッジのトリニティカレッジに入学したのです。数学科の学位試験の成績は 2 番でした。そして 1884 年に、弱冠 27 歳で物理学の教授となり、キャベンディッシュ研究所長となったのです。

トムソンは数学的才能に恵まれた、想像力豊かな理論肌の物理学者でした。しかし手先はあまり器用ではなく、実際には彼の実験はほとんど彼の学生か、彼自身が私費で雇っていた助手たちの手で行われていたということです。

まわりの人たち皆から「J. J.」と呼ばれていたトムソンは、髭もろくに剃らずに、しわくちゃの服を着て小柄でしなびた教授だったと、弟子たちが回想しています。

教授であり所長でもあった彼の研究テーマは、1880 年にケンブリッジ大学を卒業して以来取り組んでいた、希薄な気体中での問題で、1890 年代半ばに、この分野ではイギリスを代表する権威となっていました。だからこそ、X 線の発見という科学革新の波を乗り越えて、もう一つ先の電子の発見という、新しい波を巻き起こすことができたといえるでしょう。それだけの準備ができていたのです。

トムソンの実験以前は、陰極線の正体が何であるかということについて、物理学者達の意見は分かれていました。ドイツでは大方の物理学者が、陰極線は電磁波に似た波だろう、と考えていました。

一方、粒子論が一貫して支配的だったのは、

ギリシャ
ローマ

| イギリス | フランス | ドイツ | イタリア |
|---|---|---|---|
| | ＊アメリカ | | ガリレイ (1564〜1642) |
| ニュートン (1642〜1727) | ＊ フランクリン (1706〜1790) | ブランド (1630〜1692) | |
| ハーシェル (1738〜1822) | | | |
| ダルトン (1776〜1844) | ラボアジェ (1743〜1794) | クラプロート (1743〜1817) | ボルタ (1745〜1827) |
| ファラデー (1791〜1867) | | プリュッカー (1801〜1868) | |
| マックスウエル (1831〜1879) | | ガイスラー (1815〜1879) | |
| クルックス (1832〜1919) | | ヒットルフ (1824〜1914) | |
| トムソン (1856〜1940) 電子の発見 1987 | ベクレル (1852〜1908) ウラン放射能発見 1896 | レントゲン (1845〜1923) X線の発見 1895 | |

放射線発見物語
これまで（1〜4回）に登場した
主な科学者たち

イギリスでした。光粒子のニュートン、原子のドルトンといぅ伝統がありました。したがって多くの科学者が、陰極線は粒子であると考えていたのでした。

イギリスの化学者、ジョン・ドルトン(1766-1844) は、原子の考え方に明瞭な理論を提供した科学者といえるでしょう。彼の発見した『倍数比例の法則』は、「2 種の元素が化合して 2 種以上の化合物ができるとき、化合にあずかる元素の重さの比は、簡単な整数となっている」というものです。これは各元素を構成している原子の相対的な重さの比、として説明されたのでした。

19 世紀の終わり頃になると、原子の概念は多くの科学者に知られるようになりましたが、まだ一般的に受け入れられた訳ではありません。とくにドイツの科学者達は、目に見えない原子というような概念に、抵抗を感じていました。

しかし、ファラデーが電気化学の諸法則を仕上げたときから、それが成立する原理を説明するのには、電荷を持つ粒子の考えがもっとも合理的であるように思われたのです。

ストーニーが、電気が連続的な流れではなく、一定の最小限の電荷を持つ粒子であると考え、それを「電子」と呼ぶように提唱したのは、そのような背景があったからです。

つまり 1897 年から数年かけて、トムソンはこの粒子・波動論争に決着をつけたのです。電子は原子よりもはるかに微小な粒子だったのです。彼自身が 1898 年に王立協会でそのことを報告したとき、集まった科学者達に全く信じてもらえなかったということです。

トムソンの実験によって示された陰極線粒子の質量が小さいことも、また、この粒子が基本粒子であるという考えに向かわせました。つまり陰極線粒子は原子よりもはるかに軽いので、それが原子の構成要素であるという、可能性が出てきたのでした。デモクリトス、 ドルトンの原子論の伝統にしたがって、彼は自分の考えを、「物質の基本構成粒子」という言葉で説明する方向へと向かわせたのです。

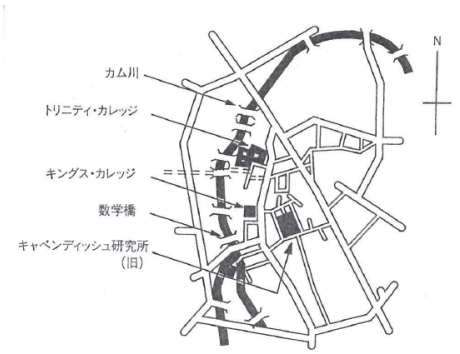
## 栄光のケンブリッジ

イングランド中東部の、ケンブリッジシャーにある大学都市、ケンブリッジ市の町中をカム川が静かに流れます。「カム川の橋」というのが地名になったのは、船が遡れる限界点で最初の橋がそこに架けられたからです。

ローマ時代から城砦が築かれ、アングロサクソン時代には行政・交易の中心地となっていました。その後 13 世紀にケンブリッジ大学が創設されてからは、カレッジやホールといった施設が集中し、16 世紀にはその名がヨーロッパに伝わったのでした。

ケンブリッジ大学は、オックスフォード大学とともに古い歴史と伝統を誇ります。なにしろ 13 世紀末までに大学としての体裁を整え、1318 年には教皇の認可を得たというのです。

あのニュートンは、1661 年にケンブリッジ大学のトリニティカレッジに入学しましたが、ペストの流行で1665年8月に大学が閉鎖されたのでいったんは故郷へ帰り、1667 年に戻ってきました 。そして 1669 年に 27 歳の若さで教授となり、その後 25 年間というもの、 トリニティカレッジの大門の脇にあった実験室で、科学の研究を続けたという、そのような歴史もありま




ケンブリッジ市街

した 。

創立以来なんと 680 年が過ぎようとしているのです。その長い歴史の中で、ケンブリッジ大学は時代の移り変わりを反映して自ら改革を行いながら、今日のような学問と研究の学府としての性格を強めてきました。

近代科学が大学の研究所を中心に誕生しようとしていた 19 世紀の後半、当時のヨーロッパの大学と同じように、その頃のケンブリッジ大学には厳密な意味での大学院は存在しませんでした。イギリスにおける自然科学の研究 ・教育の立ち遅れに対する内外の批判に応えて、1874 年、同大学の名誉総長デボンシャー公、すなわち W. キャベンディッシュからの寄付金を基に、キャベンディッシュ研究所が設立されました。

初代所長にはかのマックスウェルを迎え、数人の専任教授が学部学生を教える傍ら、開設当初から主にケンブリッジの卒業生たちが、各カレッジのフェローの資格を得るために自主的な研究を行っていました。1884 年にトムソンが 28 歳の若さで第 3 代所長に就任する頃までには、キャベンディッシュ研究所の伝統は確立し、毎年教授陣および研究生が質の高い研究論文を次々と発表していました。

ところが 1895 年、ケンブリッジ大学の学則の改定が行われ、これがキャベンディッシュ研究所に大きな変化をもたらしたのです。それまでケンブリッジ大学は、自らの授与した学位とオックスフォード大学の学位しか、正式な大学卒業の学位として認めていなかったのです。

したがってキャベンディッシュ研究所で研究することを許された研究生は、ほとんどケンブリッジ大学の出身者で占められていました。1895 年の改定ではこの規定が撤廃され、他大学の出身者でもキャベンディッシュ研究所で研究することが許され、しかも独創的な研究論文を提出することによって、ケンブリッジ大学の学位を得ることが出来るようになったのです。

その結果、1889 年に設けられた「1851 年万国博奨学金」と呼ばれる、イギリス政府の助成を受けた他の大学出身者が、キャベンディッシュ研究所に集まるようになりました。もちろん厳しい選抜試験にパスした、若い優秀な研究者の卵たちでした。1895 年の秋、最初の 4 人の奨学生が研究所にやってきました。そのうちの一人がニュージーランドからはるばる渡ってきた、アーネスト・ラザフォードだったのです。

とにかく今日まで、キャベンディッシュ研究所は、イギリスを代表する物理学者を指導者に迎え、19 世紀末から 20 世紀後半にかけての物理学の革新と発展に重要な役割を果たしました。ここから 22 人ものノーベル賞授賞者を輩出しているということからも、その際立った独創性、創造性がうかがわれるというものです。

この研究所の成功は、歴代所長の卓越した指導力に加えて、当初から、学部レベルの教育実験ではなくて、先駆的な科学研究に重きをおいたことによってもたらされたと言えるでしょう。

参 考 文 献

1) X 線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 電子と原子核の発見、スティーブン・ワインバーグ著、1986、日経サイエンス社
3) 原子を飼いならす、ハンス・フォン・バイヤー著、1996、草思社
4) 科学史の世界、大野誠、小川真里子編著、1991、丸善

---

*放射線と産業、No. 71 (1996) 49 - 53 より転載（全 8 回連載分の第 4 回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第 5 回　α 線、β 線、そしてγ線*

吉川 秀夫
元日本原子力研究所

### 19 世紀末の社会

1896 年 1 月はじめ、ドイツのレントゲンによるX 線発見のニュースが、いち早く世界中に伝わりました。その刺激を受けてすぐに、フランスのベクレルの放射能の発見があり、さらに翌 1897 年の、イギリスのトムソンによる電子の発見へと続きました。ここまではすでにお話した通りです。

そのあと、さらに放射能と放射線に関する研究は急速に展開し、まもなく 20 世紀の核の時代を迎えることになります。1896 年といえばちょうど 100 年前。日本流にいえば明治 29 年になりますが、間もなく 20 世紀を迎えようというこの時代を 、振り返ってみましょう。19 世紀末のそのような科学上の連鎖反応の、社会的背景を知りたいと思うからです。

私たちは 100 年前というと、現在と比較してたいそう前近代的な社会環境を想像しがちです。たしかに情報流通手段としての、TV もインターネットも出現していませんでした。交通輸送手段としての自動車も飛行機もまだ実用の段階ではありませんでした。しかし、新聞や雑誌は、新しい印刷技術を利用して十分に社会の役に立っていたのでした。また、蒸気機関の発達のおかげで、鉄道網は整備され、汽船は世界の海を自由に往来していたのです。

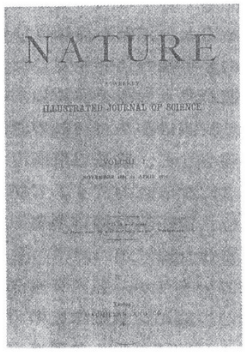
18 世紀から 19 世紀にかけて産業革命を経たヨーロッパの技術は、飛躍的な発達を成し遂げていました。その象徴のように、312 メートルのエッフェル塔は、すでに現在のような形で、パリを見下ろしていたのでした。

例えば印刷技術を考えてみましょう。ドイツのグーテンベルクが活版式印刷技術を発明したのは、15 世紀の中頃でしたが、その後 350 年というもの、ほとんど進歩がなかったのです。19 世紀に入って、日刊新聞やその他の定期刊行物の普及などとともに、印刷の高速化の必要性が増し、改良に継ぐ改良が加えられました。そして 1860 年頃に、紙型鉛版法が発明されて、間もなく近代的な輪転機システムが完成したのです。19 世紀のはじめ頃からの 100 年間で、印刷の高速化は数千倍になったと推定されています。

このような印刷技術の進歩を背景に、1869 年にはイギリスの科学雑誌『ネイチャー』が創刊」され、フランスでは 73 年に科学アカデミーの定期会合の報告を主体とする雑誌『コントランデュ』が創刊されています。これらの科学雑誌が、科学情報の伝達に大きな役割を果たしたことはいうまでもありません。

しかし印刷物は、積んでおかれただけでは何の役にも立ちません。それを配布するシステムが伴わなければなりません。それが郵便制度です。その時代この制度はどこまで整備されていたでしょうか。

イギリス本国で郵便馬車による全国的な郵便システムが出来上がったのは、1516 年のことでした。その後時代と共に整備され、運営主体や



ネイチャー誌創刊第 1 巻(1870年)タイトル頁

料金制度、切手の制度が確立しました。

しかし各国の郵便制度の独自の発展によって、その違いが際立つようになり、運営上の障害となりはじめました。そこで1860年代から国際的な調整の努力が行われ、75年に万国郵便連合が結成されました。日本も77年(明治10年)に加盟しています。これによって、国際的な規模での近代的な郵便制度がスタートすることになったのです。

このように19世紀末の近代科学の急速な幕開けは、研究論文が印刷物となって、国内はもとより外国の科学者達にも速やかに届けられるという、国際的なシステムが確立していたからこそ、実現したのだと言えましょう。今日的な言葉で表現するならば、「科学情報の流通機構が整備されてきたことによって、科学は加速度的に進歩した」といってよいのでしょう。

交通、通信については、アメリカ大陸を例にとってみましょうか。東海岸のニューヨークと西海岸のサンフランシスコの間で電信線が通じたのは1861年のことで大西洋横断海底電信線が敷設されたのは、その5年後の1866年でした。

一方、鉄道が北米大陸を横断したのが1869年です。とにかく時間はかかったものの、あの広大なアメリカ大陸ですら、鉄道で東海岸から西海岸まで行けるようになったのです。ですから、1890年代ともなれば、遠距離交通は馬車の時代をとっくに過ぎていました。

海はどうでしょうか。アメリカ海軍の軍人であったペリーが、東インド艦隊を率いて日本の浦賀に来航したのが1853年のことです。翌年幕府は横浜で和親条約を結んで、開国という事態に至ったことは、日本人ならよく知っている歴史のひとこまです。

それに、スエズ運河の開通が1869年でしたから、19世紀の末には、大型客船で世界の海を旅することも、不可能ではなかったのです。フランスのSF作家ジュール・ヴェルヌが、『八十日間世界一周』を書いて、大評判になったのは、1872年のことでした。このとてつもない空想冒険小説は、次のような文章で終わっています。

「実際、人は、それほど大きな利益がなくても世界一周をするのではなかろうか?」

若き日のアーネスト・ラザフォード

## 地球の反対側から

地球儀を眺めてみればすぐ分かるように、ニュージーランドは、イギリスから見ると地球のちょうど反対側に位置しています。オーストラリアのさらに遠方ですから、当時の感覚でいえば、まさに地の果てであり、文明の果てるところ、というのはいい過ぎでしょうか。

アーネスト・ラザフォード(1871-1937)は1871年8月30日、ニュージーランド南島のネルソンの南約20キロのブライトウォーターで生まれました。ネルソンがイギリスの植民地になってから30年ほどたったころです。しかしこの地の植民者たちは、本国イギリスの閉鎖的な社会状況にあきたらず、海外に出て伝統の自立精神によって、よりよい生活をもとめようとした、有能かつ勤勉な職人たちでした。

また彼らは学校教育に熱心で、1842年に、植民地が形成されてから13年しかたたないうちに、ネルソン・カレッジを創設したのです。そして本国から有能な教育者を呼び寄せることにたいそう熱心でした。

ラザフォードは、このカレッジで教養科目を優秀な成績で修め、さらにニュージーランド大学の奨学金を得て、カンタベリー・カレッジに進み、数学と物理学で首席で学位を取って、大学課程を卒業しました。引き続いて大学の研究室で研究活動を開始し、最初の論文を書き上げたのです。1894年のニュージーランド学会会報に掲載された論文は、『高周波放電による鉄の磁化』というものでしたが、その中で、J. J.トムソンの論文が、適所に引用されていたというこ

とです。

話は少しさかのぼりますが、1851 年にロンドンで開催された第 1 回万国博覧会は、大成功に終わりました。イギリス政府は、その利益金を科学と教育の振興に振り向けることとし、博覧会記念科学奨励制度を創設したのです。この制度による高額の奨学金は、本国在住の研究生と同様に、海外の植民地の研究生にも授与されるところに、特色があつたのです。2 年ごとにニュージーランドの学生にも、その専攻分野にかかわりなく、奨学金が与えられることになっていました。

ラザフォードは 1894 年にこの候補者にあげられていたのですが、「次点」という妙な立場にいたのです。しかし本命の化学を専攻する候補者が、個人的な理由から辞退したため、ラザフォードにその権利が回ってきたのでした。この知らせをラザフォードは、農場でジャガイモ掘りを手伝っているときに聞いたということです。そして鋤を投げ捨てて、叫んだという伝説が残っています。

「これでジャガイモ掘りもおわりだ」

一方本国のケンブリッジ大学は、それまでの制度を改革して 1895 年に、はじめて他の大学からきた大学院研究生に対して学位を与えることを決めました。運命はどこまでもラザフォードに味方しました。この朴訥な植民地の青年を、

1851年万国博の公式カタログのタイトル頁

どうしても世界で最高の水準を誇るケンブリッジ大学に押し出そうとするかのようでした。

## トムソンからラザフォードへ

1895 年 9 月、24 歳になったラザフォードは、到着したばかりのロンドンで、J. J. トムソン教授・所長からの、キャベンディッシュ研究所への入所を歓迎する旨の手紙を受け取ったのでした。この手紙こそ、彼が待ち望んだものであり、この手紙ほど彼を安心させ、喜ばせたものはなかったでしょう。

ラザフォードは、ケンブリッジの制度改革でキャベンディッシュ研究所に入ることができた研究生の第 1 期生となりました。キャベンディッシュ研究所での研究生活の当初は、それほど快適なものだったとは思われません。何しろ伝統の重みが、よそ者にはきつく感じられたことでしょう。

しかし年が明けて 1 月になると、X 線発見という嵐が吹きまくりました。J. J. トムソンのグループは追試を急ぎ、X 線の解明に取り組んだのでした。新米の研究生は、連日夜遅くまで実験にかかりきりのなかで、毎日のように新しい発見がある物理学の研究の面白さを、たっぷりと味わったことでしょう。

その研究成果の一つは、96 年 3 月に『レントゲン線にさらされた気体中の電気の通過について』という題名で J. J. トムソンとラザフォードの連名の論文になっています。ここではラザフォードの肩書が、「1851 年博覧会研究生」となっているのが目を引きます。

キャベンディッシュ研究所に参加してから 2 年が経過した 1897 年の夏に、奨学金研究生の身分の更新に当たって、さらに 3 年の継続を申請しました。J. J. トムソンはこのとき、物理学者としてのラザフォードに最大限の賛辞の言葉で、推薦状を書いたのでした。

この時ラザフォードは、「ウランの放射線の電気的作用について」という課題で審査を受けたのです。1897 年といえば、J. J. トムソン自身が電子の実在とその証明、さらにその質量の決定のための実験を行っていた時期でもあります。つまり現代の科学史年表で、電子の発見と記さ

れている、その実験の最中であったのです。

同じ研究所の同じ研究室で、彼自身も協力して彼の目の前で電子発見の成果を上げられたというのに、ラザフォードは別の分野に目を向けていたということは、何を意味するのでしょうか。目先のことではなくて、もっと先を見ていたということでしょうか。

J. J. トムソンは自分の研究や、研究所長としての業務の忙しいときでも、ラザフォードに調査や講義や著作の機会を与えるなど、とにかくラザフォードを引き立てたのでした。それは単に研究上のことばかりではなかったようです。ラザフォードがはじめてケンブリッジへ到着したとき、しばらく自宅で面倒を見たのも、トムソン夫妻のまったく個人的な心づかいであったと伝えられています。

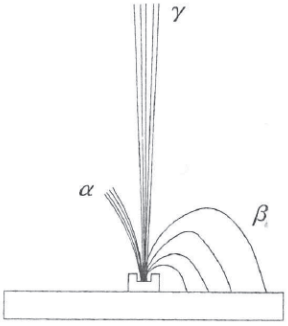
夫人はまた、また同じ 1897 年には、ニュージーランドから、ラザフォードの婚約者のメアリー・ニュートン嬢を呼び寄せて、自宅に 1 週間ほど滞在させてもいたのです。

「J. J.トムソンの功績は、電子発見の他には、ラザフォードを発見したことだ」と、後に好意を持って皮肉られるほどの、引き立てぶりだったようです。はるかな植民地からきた若い物理学者に、将来花開くであろう才能の萌芽を認めて、彼を引き立てようとしたその行為に、指導者のあるべき姿を見る思いがしてなりません。

さらに 20 年ほど後の、1919 年のことになりますが、J. J. がキャベンディッシュ研究所の後任教授・所長としてラザフォードを指名したとき、研究所の管理を全て彼に任すという書簡をしたため、彼はその約束を厳密に守ったといわれています。J. J. は長い間キャベンディッシュの専制君主でしたから、その支配から完全に手を引くとは、世間が見ていなかったのです。しかしそのような予想に反して、ラザフォードに、即刻、すべてを任せたのでした。J. J. の指導を受けて、本当の意味で物理学に足を踏み入れたラザフォードは、J. J. を越えて、原子核の世界を開いて行くのでした。

## 放射線の解明へ

さて、1896 年以降 1900 年までの間、放射線の研究はどのように展開したでしょうか。1896 年にベクレルがウランからの放射線を発見すると、ラザフォードは、1897 年からはそれまでの X 線研究の経験を応用して、ウラン線によるイオン化の測定にとりかかりました。



3 種類の放射線

フランスではキュリー夫妻（ピエール 1859-1906、マリー1867-1934)も、ウランから出る放射線の研究に着手していました。彼らは 1898 年にトリウムがいわゆるウラン線を放射することを発見、マリー・キュリーはこれに「放射能」という言葉を用いたのでした。またちょうどそのころ、彼らはウランよりもはるかに強い放射線を出す新元素、ポロニウムとラジウムを発見しています。

キャベンディッシュ研究所で研究を重ねていくうちに、ラザフォードはウランから 2 種類の放射線が出ていることを確かめました。1898 年の時点で、その正体はまだよく理解されなかったのですが、とにかく正電気を帯びた放射線をα線、負電気を帯びた方をβ線と名づけました。これは単に、ギリシャ語のアルファベットの最初の 2 文字をあてたもので、それ自体に意味はなかったのです。彼らは、お互いに研究の進展具合を意識しながら、競争のように、新しい原子核物理学、原子核化学の世界をひらくのに夢中でした。

ラザフォードにしても、放射線に区別をつけて名称まで与えたのに、その正体を明らかにできたのは、1900 年代に入ってからです。しかしあまり時間をおかないで、β線は陰極線、すなわち電子であることがわかりました。

1900 年になって、磁界の影響を受けない放射線が発見されたとき、ラザフォードはその本性

が電磁波であることを突き止め、γ線と命名しました。この放射線はよくものを透過するX線と似ていることが明らかになりました。

しかしα線の正体は相変わらず不明のままでした。その後ラザフォードは、特にα線に研究を進め、その知識をもとに原子と原子核についての研究を進め、20世紀物理学の基盤を形成する幾つもの成果を生み出すのです。

ラザフォードは二つの大きな業績を残したと言えます。その第1は、放射線の実体を明らかにし、放射能が原子の自発的変換であるという、決定的な証明です。第2は、原子構造を探求し、このようにして得られた知識を、原子核の破壊に利用することでした。この結果がついには、原子の内部エネルギーの利用にまで発展することになったのは、現代に生きる私達がよく知っていることです。

ラザフォードの考えはいつもきわめて単純なものでした。ニュートン以来、3世紀も続いた物理学の激しい進歩のあとで、物理学の概念がより複雑に、より込み入ったものに発展するだろうというのが大方の考えるところでした。そしてすべての単純な概念は放棄されるだろうという予感さえあつたのです。

ラザフォードは最も単純な概念をもとに研究を進めたばかりではありません。いくつもの見事な実験を、簡単な装置や器具で行ったのです。ラザフォードの業績の最も非凡な特色は、この様に単純な概念と器具とであれほど深遠かつ重要な成果をもたらしたことでしょう。

少し後のことになりますが1911年(明治44年)、α線の散乱実験にもとづいて、ラザフォードはその研究成果を世界に発表しました。彼は原子の重さのほとんどは、その中心にある非常に小さい、かつ正電荷を帯びた原子核に集中しているのだと推論しました。原子核の直径は原子のそれの1万分の1くらいで、原子の残りの部分は非常に軽い電子がいっぱい詰まっているというのです。現代の原子構造理論の基礎を提示したのです。

それに先立つ1904年には、日本の物理学者長岡半太郎(1865-1950)が土星型原子模型を発表しています。その長岡博士が、1911年のはじめに、ヨーロッパ視察のおりにキャベンディッシュ研究所を訪問して、ラザフォードの実験装置を目の当りにしています。そしてその実験装置の簡単なこと、またそれによって得た成果のすばらしさに驚嘆したという記録が残っています。

ラザフォードについて書かれた伝記の類いはかなりたくさんあります。そしてどれも興味深く彼の人柄や彼の生き方を伝えています。それだけ人間としてスケールが大きく、周囲の人達に与えた影響も大きかったと言えるかもしれません。そのような伝記の一つ、イギリスの科学史家J. G. クラウザーが1950年に著した本は次のような文章で始まっています。

> 「ファラデーに匹敵する才能を持った実験物理学者は、ラザフォードが現れるまで誰もいなかった。この二人のどちらがすぐれているかは、現在よりも21世紀になってからのほうが決めやすいであろう。」

20世紀はまもなく終わろうとしています。ラザフォードが拓いてくれた原子核の世界は、否応なしに、地球上の文明を新たな段階まで導く技術を、システムを生むことになりました。さて、21世紀の人類はラザフォードをどのように評価するのでしょうか。

参 考 文 献


1) X線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 電子と原子核の発見、スティーブン・ワインバーグ著、1986、日経サイエンス社
3) 原子を飼いならす、ハンス・フォン・バイヤー著、1996、草思社
4) ラザフォード、J. G. クラウザー、1961、筑摩書房
5) Rutherford and the Nature of the Atom, by E. N. Andrade, 1967, Doubleday and Company lnc.


---


*放射線と産業、No. 72 (1996) 57‐61 より転載（全8回連載分の第5回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第 6 回　N 線は存在しない*

吉川 秀夫
元日本原子力研究所

### 過去と未来のはざま

19 世紀末の文明社会では、産業革命を経て、技術の進歩が科学を未知なる世界へ追い立てていました。何が発見されてもおかしくない、そのような雰囲気が支配していたといっても、過言ではありません。

それは単に科学の世界だけに限られた現象ではありません。技術の進歩を享受する大衆社会が、科学の公理や定理とは無関係に、ただ斬新なもの、奇妙なものへの好奇心をかき立てていたのです。いわば知識のバブル期にあったというべきでしょう。例えば、天文学上の観察結果から、ついには火星人の登場にまで飛躍してしまった、時代の想像力というものを振り返ってみましょう。

1898 年に、イギリスの作家 H. G. ウェルズ (1866-1946) が、空想科学小説『宇宙戦争』を著わしました。タコのような風体をして、人類よりも進歩した火星人が、地球に侵攻し、ロボット兵器で人類を殺戮して回るのですが、やがて地球上の細菌に侵されて自滅してしまう、という粗筋です。無邪気な大衆社会は、これを容易に信じ込んだのでした。

このとてつもない空想科学小説の下敷きになったのは、その 3 年前の 1895 年に、アメリカの天文学者、パーシバル・ローウェル (1855-1916) が一般読者向けに書いた、『火星』という本だといわれています。その中でローウェルは、火星に知性のある生物が住んでいるかもしれないこと、彼らは網目状の水利システムを利用しているかもしれないことを述べたのです。

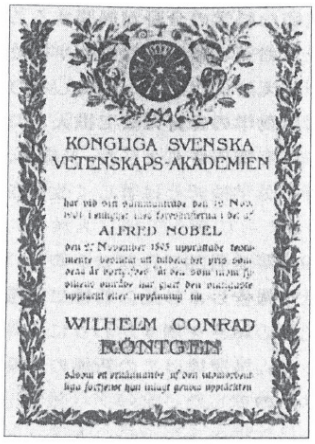
ローウェルはもちろん、まじめな、好奇心にとんだ観察者でした。彼が 1894 年の火星接近の際に、天体望遠鏡で火星の表面を詳細に観察した成果が、現代の常識からすれば、とてつもない想像力をかき立てたのでした。

とにかくそのような時代風潮の中で、19 世紀は終焉を迎えることになりました。顧みれば 19 世紀の社会が経験したすさまじい変転は、どのような意味をもっていたのでしょうか。そのあとに何を生み出そうとしているのでしょうか。その答えが見出せないままに、詩人の心は、重苦しいさまざまな思いに閉ざされていました。

「この荒涼殺伐とした光景は、今まさに去ろうとする/この世紀の空しく横たわる遺骸、/どんよりした冬空はその納骨堂、/吹きすさぶ風はその死を悼む悲歌、とも思われた。」

イギリスの小説家として有名な、トマス・ハーディ (1840-1928) の『夕闇に鳴くつぐみ』と題する詩の一節ですが、1900 年 12 月末に、ある雑誌に掲載されました。まさに過去と未来のはざまに悩む、詩人の呟きのようです。

さて、20 世紀が幕を開けると、放射線の発見という幸運に恵まれた科学者に、数々の栄誉が与えられました。レントゲンは、国内外のたくさんの賞に加えて、1901 年 12 月、ついにノーベル物理学賞を受賞したのです。物理学賞の第 1 号でした。次いで 1903 年には、ベクレルとキュリー夫妻がともにノーベル賞を授かり、放射線と放射能の発見がどんなに重要な意義を持っているかを、改めて社会に知らせるきっかけとなったのです。




1901年レントゲンに与えられたノーベル賞の賞状

しかしすべてが栄光のうちに、物理学の 20 世紀がスタートしたという訳ではありません。一方では、実際には存在しない放射線を発見したと錯覚して、実りの少ない研究に取り組むという、不幸な科学者がいたのです。

それに加えて、問題なのは、後にその存在が否定された放射線について、かなりの数の科学者たちが、存在を肯定する論文を発表し、偉大な発見と称賛したことでした。

科学者個人の問題は当然のことながら、科学界の体質そのものが問われる事態にまで発展する、そのような「事件」が起きたのです。

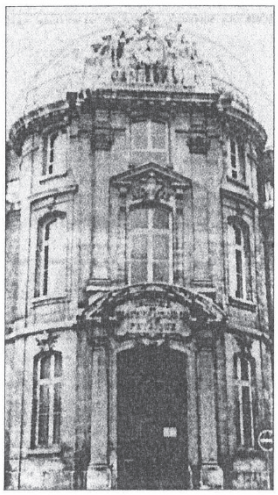
## 新種の放射線か

1903 年 2 月、フランス北東部の古い都市にあるナンシー大学のルネ・プロスペル・ブロンロ教授 (1849-1930) は、新種の放射線を発見したと報告しました。彼はこの放射線はアルミニウム、黒い紙、木などを透過し、偏光を受けやすく、屈折、反射、拡散するが、蛍光も写真作用も生じないと解説したのです。

その放射線は、薄いアルミ箔を透過し、水晶レンズの上へ導かれました。焦点の位置を印すために、極度に弱い誘導コイルから生じた非常に小さな火花を利用しました。

それというのも、この放射線の最大の特徴として、弱い火花にあたると、その火花の輝きを増大させるということがあったからです。

1903 年 5 月 25 日、ブロンロは自分が発見した放射線に、N 線という名前を授けました。こ



ナンシー大学理学部

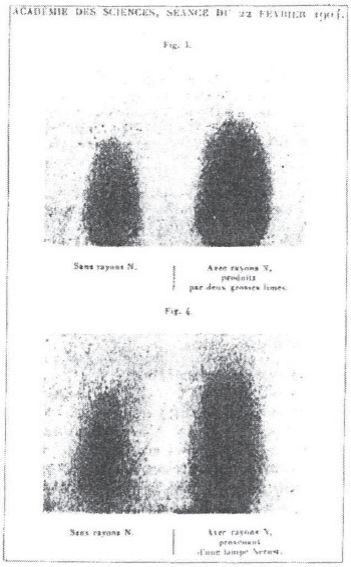
のNという文字はナンシー市のイニシャルであると同時に、彼がこの実験を行ってきたナンシー大学のイニシャルでもあったのです。

ナンシーはフランス北東部のロレーヌ地方の中心地であり、ナンシー大学は 1572 年に創立された由緒ある大学でした。北側に走る山脈を越えると、ドイツとの国境があります。ということは、X 線を発見したレントゲンがいるドイツ南西部のビルツブルグ市が、それ程遠くないということです。直接は関係がありませんが、意識の底には何かがあったことでしょう。ブロンロ教授の N 線は、X 線研究の過程で見つけたものだったからです。

研究は次第に熱を帯びてくるのです。火花の代わりに小さな炎を利用できるようになりました。はじめは「全く青かった」炎が、N 線を受けると「以前より明るくかつ白く」なったというのです。さらに、硫化カルシウムのような物質があらかじめ燐光を発するようにされていれば、N 線にさらすと、燐光の輝きが増すことを確認したと主張しました。

さらにブロンロは、N 線の透過した水晶レンズそのものがN線の源となることを観察しました。水晶レンズを燐光を放つ硫化カルシウムに近づけるだけで、後者はさらに明るくなったのです。金、鉛、白金、銀、亜鉛でも同様の結果が得られたと報告しました。

彼によれば、なんと、太陽そのものも N 線を発していたのです。また、太陽の光を浴びた一




N線作用の実験写真（ネガ）
左：平常の火花
右：N線作用下の火花

塊の小石もまた、このN線を発していることが検証できたと報告したのでした。このことから、諸物質によるN線の貯蔵という事実を認めなければならなかったのです。

その新しい放射線は、人間の眼を光に対してより敏感にする力をもつようでした。あらかじめ隔離しておいた煉瓦や小石から発したN線を、眼の方に向けてやるだけで、薄明かりの下に置かれた時計の細部まで、かなりかっきりと見ることができたというのです。

それによって新しい放射線の生理学的効果に関する、広範な科学の分野が展開することが予測されました。おそらくN線は動物や植物の生命現象に影響を与えずにはおかないでしょう。そこで研究領域は生物学の分野にまで拡大され相当の成果が得られたと報告されました。N線のおかげで、人体の理解と医学検診とは著しく改善されるはずでした。

さらに1904年2月29日、ブロンロは「新種のN線」の発見を報告しました。新種に特徴的なことは、弱い光線の輝きを増すかわりに、輝きを減ずることでした。早速彼はこの新種のN線に$N_1$線と名前をつけたのでした。

## 信じる者だけに見える

ブロンロがN線を発見した（というより発見したと信じていた）のは陰極線管から発するX線について実験しているときだったのです。しかし時をおかずに、ガス白熱灯（アウエル灯）を、放出源として利用することを思いついたのです。そのころ、ガス白熱灯は明るさの面で、大成功をおさめていたからでしょう。

しかしブロンロはまもなく、ガス白熱灯よりも白熱電灯（ネルンストランプ）を使ったほうが、より強いN線が得られると主張しました。さらに、次々と新しい線源を発見しました。背後におかれたブンゼンバーナーで、灼熱状態にまで熱せられた、鉄の薄片や銀の薄板がそれでした。それに太陽までも線源として利用できると、報告したのでした。

またブロンロ自身は、色々な方法でその放射線の波長を測り、しかもどのやり方でも、一致した結果を得ていたというのです。

N線に関するブロンロの実験は、科学の法則に合致しているよう見えたのです。フランスでは、ブロンロの研究の成果は、おきまりの拒否反応を引き起こすことなく、寛大な心で受け入れられたのです。

一見すると実験方法は科学的に妥当で、実験過程は正確に管理されているようにみえたのです。原理的には検証にゆだねられていましたし、本質的な結論は定量的な形式を守っており、それで実証済みと見なされたのでした。フランスの科学アカデミーは、ブロンロの論文をすべて刊行し、そして1904年にはルコント賞を授け、5万フランの賞金を与えたのでした。

しかし、N線は非常に奇妙な特性を有していました。N線が見られるのは、ごく僅かな例外を除けば、フランス圏内の実験室においてだけでした。しかも圧倒的に、ナンシー大学の実験室に集中していたのです。

アルプスを越えて向こう側のドイツでは、N線は、どんな優秀な実験者にも感知されることはなく、その正体をかいま見せることもなかったのでした。またブロンロは、ベクレルや キュリー夫妻の例を、十分に理解していました。もちろんノーベル賞についてもです。言わばその眼で見ていたのです。次第にどんな局面も、新

しい放射線の発見を本当らしく見せるようになっていました 。報告書にも、彼らが発見した放射線の特性と比較するような記述が多くなってくるのでした。

それが 1870 年代以前であったら、N 線の発見は、ほんの些細な誤りの原因さえ熱心に追求せずにおかない、全く疑り深い懐疑主義と遭遇していたに違いありません。しかし時代が変わっていました。赤外線、紫外線、全ての不可視光線、レントゲン線、ウラン線、最後にラジウムやアクチニウムなどの発する放射線が明らかになりました 。それらの相次ぐ発見のすべてが、科学者の研究をそうした分野へと誘い、社会が新種の放射線の登場を驚かずに受け止め、またそれを期待するような社会的ムードを高めていたといっても過言ではないでしょう。

物理学においてさえ、批判の隙をつく誤謬が紛れ込むことの可能な雰囲気にあったのでしょう。もっともこの時代に限ったことではないかもしれません。今日の科学界でも、類似の問題はありうるのですから。

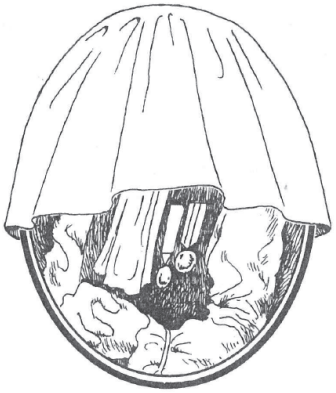
しかし、それでも N 線は、2 歳の誕生日を迎えることはありませんでした。

## N 線は存在しない

1904 年 9 月 29 日、イギリスの科学雑誌『ネイチャー』が、アメリカの物理学者、ロバート W. ウッドによる衝撃的な証言を掲載しました。ナンシーの実験室への訪問について、彼は何のはばかることなく報告したのです。

つまりウッドは、ブロンロや助手の観察結果を少しも変えることなく、こっそり実験装置に手を加えたというのです。そのやり方は確かに、公明正大なものとは言えなかったでしょう。しかし結果は、疑いの余地を残さないものでした。

実験のすべては闇の中か、薄暗闇の中で行われていたので、ウッドは全く容易に、実験装置からアルミニウムのプリズムをはずしてしまうことができました。それこそが N 線のスペクトルの発生の根源となっていたはずのものです。しかしブロンロと助手は、そのことに全く気がつかなかったし、実験そのものが乱されることもなく続けられたというのです。



ブロンロ教授の肖像画は
公開しておりません

彼らは同じデータを取り続け、最大値も最小値も同じ点に、かたくなに印し続けたのです。ウッドは最初から策略を用いるつもりではなかったのです。ウッドは簡単な付加実験を提案していました。たとえばプリズムの位置を変えるとか、燐光を放つスクリーンに他の物体を近づけるというような例でした。それがプリズムをひそかに取り外すとか、物体を近づけるふりだけにする、といった予定外行動を伴ったということだったのです。

ブロンロは動ずることなく、同じ観察を続けていました。すべてはもう決定的な錯覚としか言えないデータでした。このアメリカ人の物理学者には、N 線効果としての光度変化を、少しも感ずることは出来ませんでした。ところがブロンロと助手には、それが明瞭に判別できたというのです。ブロンロはたしかに写真を撮ってはいましたが、それが客観的な証拠になりえたでしょうか。

ウッドは、はっきりとそれを否定しました。第一に、 裸眼では観測不可能な変化が、感光板に明瞭に現れうるとは、彼は考えなかったのです。しかも決定的な要因は露出時間でした。輝きの差異を明らかにするための感光板を、正確な露出時間で均一に扱うことが、条件として確立されていなかったからです。

しかしウッドは、ブロンロの誠実さを疑ったりはしませんでした。彼と彼の助手が詐欺を働いたとは断定していません。強い自己暗示の下で、無意識に実験をねじ曲げたと結論したので

す。

1904 年 10 月 22 日になって、フランスの科学啓蒙の雑誌『科学レビュー』誌が、ウッドの書いた記事の翻訳を公表しました。10 月 29 日には、さらに一歩進めて、正面から N 線の信憑性の問題を提起しました。

「N 線は存在するのか」

この 8 ページの記事は、N 線に関する厳しい総括を行い、敢然とフランスの全科学者へ問いかけ、訴えたのです。というのは、フランス科学の名誉がかかっていたからです。問題は既に、国全体のものとなっていました。

当時フランスにあっても、ブロンロの実験は微妙で困難で、主観性の入り込みやすいものだという認識はあったのです。実験が重ねられましたが、たいていは何も見られないという結果に終わりました。しかしそこから何を結論すべきでしょうか。答えは必ずしも明白ではありませんでした。

N 線の発見者が眼にしたものを、彼らが見ることに成功しなかったとしたら、おそらく彼らに適切な教育が欠けていたからなのだと、強調したフランスの有力な科学者もいました。

天体望遠鏡にしろ、顕微鏡にしろ、本当に何が見えているか理解できるようになるには、知識と技術の両面での修練を必要とするのです。

しかし、見えるはずのものを予測しながら、バイアスのかかった観察、つまり、実際に知覚するものによりも、予期するものに引きずられた観察をしてしまう恐れがあることは、誰しも否定できないでしよう。

1903 年に発見され、1904 年末には、おそらく何人かの不屈なフランス人を除けば、N 線の科学的存在は否定されたのです。フランスの科学界は、N 線が存在するという確証を得るのには成功しなかったという判定でけりをつけ、論争を劇的なものにすることなく、終止符を打ったのでした。

この問題の背景には、科学のナショナリズムが見え隠れすることに気付くでしょう。フランスでは、フランスの尊敬すべき物理学者であるブロンロ教授を、過ちを犯した科学者として、声高に非難することはありませんでした。フランス以外の国の科学者の間には、さまざまな非難の声があったにもかかわらず。国内では後ろ指を指して云々する科学者はいなかったのです。

ブロンロ教授は、その後も教育者としての活動を続けましたが、研究を発表するということはありませんでした。そして 1910 年に、定年を待たずに退職し、81 歳で 1930 年に亡くなりました。

ここで、この「事件」からの教訓をとりまとめたりするのはやめましょう。放射線発見の歴史の、過ぎてゆく 20 世紀の初頭の、密やかなこぼれ話として、黙って見送ろうではありませんか。

参 考 文 献

1) X 線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 反＝科学史、P. チュイエリ著、1984、新評論社
3) 思い違いの科学史、青木国夫ほか著、1978、朝日新聞社
4) われ思う、ゆえに、われ間違う、ジャン・ピエール・ランタン著、1996、産業図書社

---

*放射線と産業、No. 73 (1997) 52 - 56 より転載（全 8 回連載分の第 6 回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

# 特集／放射線発見物語

## 第 7 回　天にも地にも放射線*

吉川 秀夫
海洋科学技術センター、元日本原子力研究所

### 研究こそ人生

1895 年はじめ、一人の少年がミュンヘンからイタリアのミラノへ向かう列車に乗っていました。16 歳のアルバート・アインシュタイン。彼はギムナジウムを逃げ出して、両親の住むイタリアへ行こうとしていたのです。

両親は新しく電気事業を始めようとして、前の年に少年一人を残して北イタリアへ移り住んでいました。1895 年といえば、50 歳のレントゲンが X 線を発見したその年です。しかし、少年アルバートには、全く関係のないことでした。

チューリッヒ工科大学は、ドイツの中学校の卒業証書がなくても、受験の資格を与えていました。アルバートは、その年の秋に、資格には 2 歳幼かったのですが、特別許可をもらって受験したのです。しかしこれは成功しませんでした。そこで現地の高等学校に入って、翌年再び受験し、今度は見事に合格したのです。

レントゲンと若き日のアインシュタインが何の関係もなかったと記しました。34 年という時代の差があるからです。それでも二人の生い立ちには、共通した点が多いのです。二人が育ったそれぞれの家庭では、父親が小規模でしたが事業を営んでいました。技術革新の影響を受けて変動する社会にあって、息子の代には技術が、学問が大切だと感じていたのです。つまり息子には高等教育を受けさせなければという、家庭の思いがあつたということです。

しかしレントゲンもアインシュタインも中学校の卒業に失敗し、卒業証書を手にするこができませんでした。二人とも頑迷な教師との関係がこじれて、世間的に見れば不幸な状態に追い込まれてしまったというわけです。そして、現在でいう浪人学生という状態の中から、ついには難しい入学試験を突破して、チューリッヒの連邦工科大学に入ることができたのです。スイスの自然は、若い二人を自由にのびのびと育みました。

しかし大学を卒業してすぐに、幸運のうちに華々しいスタートをきった、というわけではありません。レントゲンは 1870 年に、南ドイツのビュルツブルグ大学の物理教室の助手としての職を得たものの、なかなか助教授にもなれませんでした。

一方、アインシュタインは、卒業しても定まった就職先もないままにアルバイトでしのぎながら、2 年後にベルンの特許局の技術専門職に就くことができたという始末でした。1902 年 6 月のことでした。

このように科学者として、かなり地味なスタートを切ったということは、後の二人の人生にどのような意味をもっていたでしょうか。もしも若いときから、科学者として華々しいデビューをしていたとしたら、栄光は彼らの上に輝いたでしょうか。

1895 年 11 月、50 歳のレントゲン教授が不思議な光線に巡り会って、 7 週間というもの、大学の研究室に閉じこもり、その解明に全精力を

チューリッヒ・ポリテクニクム（現、工科大学）の本館

注ぎ込んだときの気迫には、助手さえも近づけませんでした。

ドイツ生まれのアメリカ人作家、ロバート・ニツスキは、レントゲンの実験に取り組む様子を次のように記しています。

「彼は研究することが好きであり、彼は研究が即人生であると考えていた。彼の実験室は実に“至聖所" (ユダヤ神殿の最も聖なる場所)であった。」

一方 26 歳のアインシュタインは、19 世紀末の科学者をあれほど苦しめてきた物理学の糸のもつれを、わずか半年ほどで解いて見せたのです。まず 1905 年 3 月、彼は連続と不連続は対立する理由がないことを示しました。光も物質と同じく粒でできているというのです。

6 月にはエーテルの存在を否定した上で、光の理論を築き上げました。この「特殊相対性理論」によって、力学と電磁気学の不整合はなくなったのです。まさに物理の世界に革命をもたらしたのでした。

彼もまたレントゲンと同じように、生涯を通じて、思索し研究することこそが人生であり、「思考の喜び」というのが彼の口癖だったということです。

**エネルギーの源泉**

特殊相対論の発表から 4 ヵ月もたたないうちに、アインシュタィンは追加の形でわずか 3 ページの短い論文を発表しました。1905 年 9 月 27 日に、編集者に送られたその論文には、物理学で最も有名な公式　$E=Mc^2$　が記されていました。

もし物体が光の形である量 $L$ のエネルギーを放出すれば、その質量は $L/c^2$ だけ減ることが計算によって示されたのでした。アインシュタインは、物体の質量はその中に含まれるエネルギーの量に関係していると結論しました。

物体がエネルギーを吸収すればその質量は増し、エネルギーを失えば質量は減る。従って質量 ($M$)とエネルギー($E$)は等価であり、両者を結びつけているのはひとつの変換定数、つまり

1912年　33才のアインシュタイン(チューリッヒ工科大学教授)

光の真空中の光の速さの $c^2$ にすぎない。これを用いて両者の関係を等式で表せば、$E = Mc^2$ となるというのです。

そしてアインシュタインは次のように述べています。

「物体のエネルギー保有量が著しく変化する放射性崩壊のような過程によって、わたしの理論の正しさが裏づけられるかもしれない」

それから 40 年たって、1945 年にこの公式が劇的な方法で証明されたことは、現代に生きる私たちがよく知っている事実です。

さて、このアインシュタインの公式の裏づけになるであろうという、放射性崩壊の研究のあとをたどってみましょう。まさに放射線の発見の延長上にあったからです。

X 線の発見に続いて、電子の発見があり、放射能の発見が続いて、放射能つまり放射線を出す物質の存在が明らかになりました。しかし放射能に関連して、自然にわいてきた疑問の一つは、どこからエネルギーがやってくるのかということでした。ウランは絶えず $\alpha$ 線 (ヘリウム原子核の流れ) と $\beta$ 線 (電子の流れ) を放出しているように見えました。

ウランの原子は全く静止した状態から、それらの粒子をこれほど速く放出するには、相当のエネルギーが必要とされるでしょう。さらに $\gamma$ 線もあります。それは X 線よりもはるかに高いエネルギーを持っていました。

1905年アインシュタイン自筆の公式

しかもウランからの放射は、瞬間的なエネルギーの放出ではなく、一定の割合で無限に放射を続ける、ということが明らかになりました。

これは深刻な問題でした。つまり科学者でさえも、この自然のエネルギーの放出を止めることはできないのです。そして放射能に関する限り、無からエネルギーが創造されているように見えました。

放射能の発見から数年の間に、物理学の世界は危機に瀕していました。これまでの理論では説明のつかない、原子核の世界が見え始めたからです。

マリー・キュリーと夫のピエール・キュリーは、1898 年、何トンもの歴青ウラン鉱を処理して、ほんのひとつまみの放射性の粉末を得ました。そこからポロニウムとラジウムの二つの強い放射性元素が得られました。

ウランからの放射線、つまりエネルギー放出に驚いたとしたら、その 300 万倍もの強さのエネルギーを放出するラジウムには、どれほど驚かされたでしょうか。

1903 年、ラザフォードをはじめとする物理学者たちは、すべての原子は自らの中に大きなエネルギー源をもっていると考え始めました。放射能の場合には、このエネルギーのごく一部が自然に流出する、と理解したのです。

しかし 1905 年にアインシュタインが、質量がエネルギーの非常に凝縮した形態であることを、説得力をもって示しました。放射性物質がその質量のごく一部をエネルギーに変えただけで、放射能によって開放されるエネルギーのすべてを、容易に説明することができたのです。

$E=Mc^2$、しかしそれにしても何と美しい公式ではありませんか。たった 3 文字と数字ひとつの、簡潔で、そして力強く、これ以上に美しい公式はない、というのは言い過ぎでしょうか。

**放射性崩壊の謎**

放射線を手がかりに、原子の世界の幕を開けようしていたラザフォードのまわりには、各国からたくさんの優秀な科学者の卵が集まってきました。 ドイツからは、計数管で名を残したハンス・ガイガー、1938 年にウランの核分裂の発見者となるオットー・ハーン、デンマークからは原子モデルで有名になるニールス・ボーア、イギリス国内からは後に中性子の発見者となるチャドウィック、その他数え切れない人材がラザフォードのところに集まっていたのです。

1900 年から 1903 年まで、ラザフォードと共同して放射性崩壊の理論を確立したイギリスの化学者フレデリック・ソディ (1877-1956) もその一人でした。彼はオックスフォード大学で学んだ後、就職口をさがしてカナダに渡ったところ、全く偶然に、物理学者ではなく化学者を探していたラザフォードに出会い、早速共同研究を始めたのでした。

ラザフォードとソディは、ウラン原子が放射線を放つと、その本質が変化し、以前とは異なるほかの元素となる、と考えました。1903 年に二人の名前で発表された『放射性変化』と題する論文のなかで、α粒子の放射と原子の崩壊を次のように記しています。もっともこの時点では、α粒子の本体がヘリウムの原子核だということは、明らかになっていないことに注意しなければなりません。

「原子が崩壊し、水素原子と同程度の質量をもつ重い帯電粒子が放射されると、あとには

フレデリック・ソディ

前よりも軽く、そして化学的にも物理的にももとの元素とは全く異なる性質をもつ、新しい系が残る。崩壊過程は一度始まると段階ごとに測定可能な一定の速さで段階的に進行する。」

放射性崩壊の概念は科学者にとつて大変なショックでした。デモクリトスの時代からの伝統で、原子は変化しないものとして考えられてきたからです。たしかに化学変化に関する限り原子は変化しなかったのですが、放射能は単なる化学変化ではなかったのです。

放射能は原子核に関係していたのです。それは原子核の変化であり、原子核が変化すればその過程で、ある種の原子が別の種類へと変化するのはありうることでした。

あるものはα粒子を、あるものはβ粒子を放出しました。あるものはα粒子あるいはβ粒子とともにγ線を放出したり、γ線だけを放出したりしたのでした。二つの中間生成物がともにα粒子を放出する場合でも、その強さと速さが異なるのでした。

ソディがこの問題に取り組みました。いくつかの中間生成物が、同じ化学的特性を持っており、それらを混ぜると普通の化学過程では分けられないことを見出したのです。それらは同じ元素であり、それはあとで明らかになったように、電子の配列とその原子核の正電荷が同じであることを意味していました。

しかしこれらの放射性特性が異なつていることから、原子核の電荷以外の何かが異なっていなければ説明がつかないのです。

ソディは彼の発見を 1913 年に発表し、これらの異なつた種類の原子に、「同じ場所」を意味するギリシャ語から「アイソトープ (同位元素)」という名前をつけたのです。彼はこの研究で 1921 年にノーベル賞を受けました。

1914 年に原子の周期律表の持つ意味と原子番号の概念が明らかになると、ある原子が別の原子へどのように変化するか、放射性崩壊の系列の詳細が明らかになるのでした。

人類はここに至って、原子がエネルギーを放射線の形で放出しながら、別の元素に変わって行くという事実を、はっきりと知ることになったのです。

しかしなぜ同じ元素でも、安定な原子と崩壊して行く原子が、同時に存在するのでしょうか。これは物質の起源と、そして宇宙の起源に関わってくるのでしょう。しかし「謎」はまだ解けていないのです。

### 宇宙のかなたから

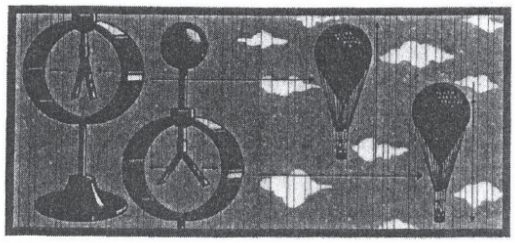
物質の究極の粒子としての原子から、放射線が放出されるということは、次第に理解されるようになりました。しかしそればかりではありません。天空から放射線が降ってくるという事実に、人類はまたも驚かされたのです。

密閉した電離箱に与えられた電荷は、時間が経つと徐々に放電してなくなってしまいます。この現象は当初絶縁の不完全さによるものと考えられていましたが、1900 年になるとそれが電離箱の中の空気の電離に起因することがわかりました。そこで電離箱の材質や充填ガスを慎重に選択したり、全体を水や鉛で遮蔽するという工夫をしても、内部の空気の電離は無くすことができませんでした。

1910 年前後になると、空気の電離が土壌中の放射性核種によるという説は、疑わしくなってきました。そしてさまざまな調査が試みられました。電離箱を地上から次第に持ち上げていくと、土壌からの放射線は空気に吸収されるため、電離箱の電離は減少していくはずでした。しかしそうはならなかったのです。土壌からの放射線が、高い高度まで達するはずはないので、それ以外の放射線が上空に存在することが考えられました。

これらの結果を踏まえ、宇宙線の存在を明らかにしたのはオーストラリア系のアメリカの物理学者、ビクター F. ヘス (1883-1964) でした。彼は 1911 年から気球に箔検電器を乗せて観測を行い、低緯度では高度 800 メートル付近から増加しはじめ、4000 メートルでは約 6 倍に、5000 メートルでは約 9 倍になることを明らかにしました。1912 年のことでした。

このことを発見したのは、実はヘスだけではなかったのですが、この事実の重要性を認め、



1911年ヘスの気球と箔検電器

このような結果は、放射性ガスの蓄積ということでは到底説明できず、どうしても地球外から一種の放射線が来ていると考えざるをえないとの結論に達しました。もしそうであるならばこの放射線は、きわめて強い透過力をもっているということになります。

このようにして発見された地球外からの放射線は、ドイツでは「高所放射線」、「ヘス放射線」、「超放射線」と呼ばれましたが、イギリス、アメリカでは「宇宙線」と呼ばれ、1920年ごろからこれが定着することとなったのです。現在では宇宙線は、宇宙空間から地球に絶えず降りそそぐ高エネルギーの粒子線と、それが大気分子と衝突して2次的に生じた粒子線と放射の総称となっています。

それによって、天体の物理学的な変化、宇宙の歴史が知られるだけでなく、エネルギーの根源を濃縮した形で示しているという意味を持っています。

この高いエネルギーをもった宇宙線は世界中の物理学者の関心を集め、多くの研究が開始され、多くの重要な発見が相次いだのです。

1927 年にはウィルソン霧箱により宇宙線の飛跡をはじめて観測できました。また1932年にアメリカの物理学者、カール D. アンダーソン放射線が宇宙空間から来るものであることを主張したのが、ヘスだったのです。
が強い磁場中でウィルソン霧箱を作動させ、宇宙線の進行方向を湾曲させて、写真撮影することによってそのエネルギーを測定しました。

その際彼は、電子と同じ飛跡をもつけれども、ただ反対方向に曲がる宇宙線粒子をとらえたのです。これが陽電子の発見だったのです。

それだけではありません。湯川博士が予言した中間子の発見も、アンダーソンが宇宙線研究中に発見したのです。1935年のことでした。

宇宙線は、不思議な電離作用の探求をきっかけに発見されたのです。その後多数の研究者によって、次第にその性質が明らかにされました。

そして宇宙線そのものが、原子核理論、素粒子論上重要な発見の宝庫となり、宇宙論の展開にも多大な貢献をしてきたのです。

参 考 文 献


1) X 線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 原子宇宙の旅、アイザック・アシモフ著、1992、二見書房
3) 原子を飼いならす、ハンス・フォン・バイヤー著、1996、草思社
4) 電子と原子核の発見、スティーブン・ワインバーグ著、1986、日経サイエンス社


---


*放射線と産業、No. 74 (1997) 53 - 57 より転載（全8回連載分の第7回）

【放射線と産業、No. 68 (1995) ~ No. 75 (1997) [8 回連載] より一挙転載】

## 特集／放射線発見物語

# 第 8 回　原子力時代の夜明け前*

吉川 秀夫
元日本原子力研究所

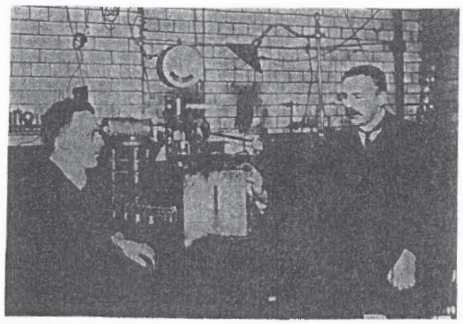
### 科学者たちの連携

1890 年代の後半から、物理学は一挙に新しいフロンティアに突入したのでした。放射線を手がかりに、X 線の発見から放射能へ、さらに電子の発見から原子核へと、その領域を物質の根源へと拡げていったのです。

こうした学問領域の拡大を背景に、1910 年代のはじめの頃まで、科学者の世界には国境が無いも同然でした。科学者達は自由に意見を交換し、また競いあって新しい発見に励んだのでした。彼らはそれをこの上ない喜びとしていたのです。

とにかく最先端の研究者の周辺には、各国から多くの若い科学者が集まってきました。その代表的な集団が、あのラザフォードを中心にしたグループでした。ラザフォードは 1898 年、キャベンディッシュ研究所の J. J. トムソン所長のもとを離れて、カナダのモントリオール市にあるマックギル大学へ、物理学教授として招かれたのです。27 才の秋のことでした。恩師である J. J. トムソンの推薦の言葉に彼の将来が予言されていました。

「私はいまだラザフォード君ほど独創的に対する強い熱意と高い能力とをもった研究者に会ったことはない。私は、彼が幸いにして選ばれれば、きっとモントリオールに立派な物理学の一派を打ち立てるに相違ないと確信する。」



1912年ラザフォードとガイガー（アルファ線計数器の前で）

この大学の物理研究室は、ある事業家の支援もあって、当時としては最高の設備を備えていたということです。ここで彼はのびのびと研究に打ち込んだのでした。彼を押えつける人物は誰もいなかったし、古めかしい伝統からの束縛もなかったのです。

1900 年の夏、彼はサンフランシスコを経由して故郷のニュージーランドへ出かけ、そこで結婚式を挙げました。帰路は花嫁を伴って、ホノルル、バンクーバーを訪れ、そしてカナディアン・ロッキーを越える楽しい旅をして、9 月に戻ってきました。

一流の科学者として、ラザフォードの名前は世界の科学界に知られるようになって、海外から多くの科学者が訪れるようになりました。その中には、後にウランの核分裂の発見の栄誉を担うことになる、ドイツの物理学者オットー・ハーン (1878-1968) がいました。

彼は 1905 年にカナダのラザフォードのもとを訪れて、1 年間ではありましたが、研究生活に明け暮れたのです。

ドイツに帰ってからも、ラザフォードは彼と生涯を通じて頻繁に文通を続け、単に研究内容についての考えを伝えるだけでなく、個人的な生活の状況までも書き送っていたということです。

一方ハーンは、1968 年に出版した自叙伝の中で、次のように書き記しています。

1910年当時のマンチェスター大学研究所の建物

「ラザフォードのところへ行った私は、最高の場所にいたと云えます。私が自分一人でよい仕事をやるには力不足であることを、自分が気づいたという点では私は賢明であったと断言できます。」

ラザフォードには「わに」というあだ名がついていたのですが、ハーンはその自叙伝の中に理由について書いています。

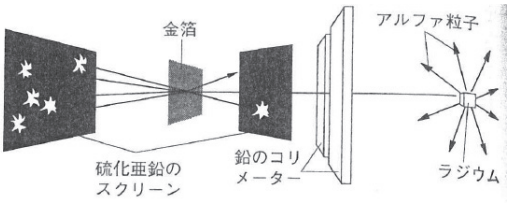
消化しえない何物かを飲み込んで、それがいつもその体内を騒ぎ回る、ある「わに」の話があったのだそうです。そして「わに」が近づいて来ると人々は、その体内から発するざわめきを聞くことができるというのです。ラザフォードはいつも大声で、そして元気に話をするので、ずっと向うから彼の声が聞こえてくるのでした。そこで人々は彼を「わに」と呼んで、それを警告としたのでしたということです。

飲み込んでいたのは、消化しそうにもない原子核だったのでしょうか。そして放射線が体から発散していたのかもしれません。そのくらい彼には存在感があったのでした。

1898 年から 1907 年までのマックギル大学における 9 年間、ラザフォードと彼の周りに集まった協力者達とは、放射能の研究に全力を上げました。原子の本質および原子レベルでの反応に関する研究の重要性が認められて、1908 年ノーベル賞が授与されました。

## 放射線研究の広がり

1907 年にラザフォードは招かれて、「母国イギリスのマンチェスター大学に移りました。



アルファ粒子と金箔を使った散乱実験

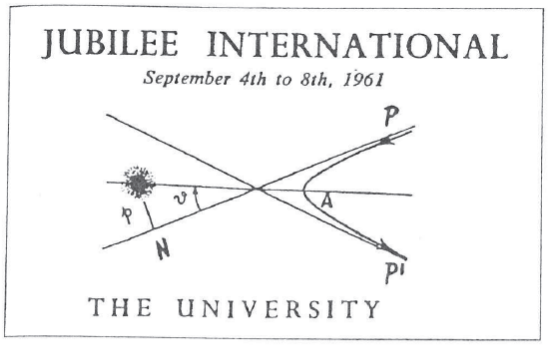
ここでも幸運なことに、多くの優秀な人材と出会ったのです。その中の 1 人に登場してもらいましょう。着任して間もなく、彼の助手となったドイツ人のハンス・ガイガー (1882-1945) のことです。ガイガーは、 ドイツのラインランド地方の生まれで、大学を終了した後イギリスに渡り、博士課程を修了した後、マンチェスター大学で物理の研究を続けていたのです。

ガイガーは早速、ラザフォードがマックギル大学で研究に着手した現象、すなわち薄い金属箔にアルファ線を通過させたときの散乱についての実験を再開しました。

そのような実験の成果をもとに、1911 年の終り頃、ラザフォードは「アルファ粒子とベータ粒子の散乱と、原子の構造」という論文を発表し、原子の構造とその証明となる実験方法を詳論したのでした。

ラジウム源から放射されてくるアルファ粒子が、金属箔を構成する原子の近くを通過すると、アルファ粒子の軌道は少しだけ曲げられる。ところが何個かのアルファ粒子が後ろに跳ね返されたのを見つけたのです。そこでラザフォードは、アルファ粒子が原子と衝突して大きな角度に曲げられたと、結論したのです。ここでラザフォードは原子核という概念に到着したのでした。

原子核には陽電荷があり、周囲に電子があるというものでしたが、とにかくその後明らかになる原子核と電子からなる原子を念頭においたものでした。このときラザフォードとガイガーは協力して、電離と呼ばれる過程を利用した、個々の粒子を電気的に数える方法を開発しました。いわゆる計数管です。これ




ラザフォードの有核原子発見50周年（1961）に用いられたシンボル・マーク

らのアルファ粒子の実験は、いわば、高速度の原子を一つ一つ数えることに成功した最初の実験と いってもよいでしょう。つまりこの実験方法が、原子物理学の研究に、確実な進歩をもたらしたのでした。

ラザフォードとガイガーは気体電離検出器を発展させ、電離箱中に高い電場を作り、 最初に発生した電離電荷を加速し、さらに電離を起こさせるようにしました。この気体増幅技術によって十分大きな電荷を集めることができ、電離を起こす核反応を 1 個 1 個検出できるようになったのです。

1913 年に発明された有名なガイガー計数管は、同じように衝突による電離の原理に基づいていますが、細部に工夫を凝らして、感度を著しく向上させたものでした。簡単にいえばイオンのなだれ現象が起き、瞬間的に電流が流れて、ガリガリという音を出すのです。したがってガイガー計数器のガリガリという音によって筒の中に進入してきた粒子の数を計算することができるのです。

このタイプの放射線検出器が、1913 年にガイガーとミュラーによって完成された今日のガイガーミュラー計数管 (ガイガーカウンター) なのです。簡単でしかも信頼のおける放射線検出器として、原子力の初期の段階で大層愛用されました。

このほかにシンチレーションカウンターの原型を開発したのもこのグループです。ラザフォードはとにかく、測れないものを測る、という概念的な開発は、誰よりもすぐれていました。それを具体的な装置に、つまり完成した計測器に仕上げたのが、物理学者のガイガーだったのです。

「ガイガーは役に立つ男で、実によく働く。万事がうまく行くようになるまで、私が手を出すようなことはほとんどない。」

と、オットー・ハーンに書き送っています。口は出すが手を貸すまでもない、というのが、ラザフォードの本当のところでしょうか。

とにかくこの教授と助手のコンビは、放射線計測器の原型というべきものを考案し、簡単でしかもすぐれた装置に作りあげたのです。

1919 年にトムソンのあとを継いでキャベンディッシュ研究所の所長になったラザフォードは、後にドイツに戻ったガイガーに宛て、「マンチェスター時代は愉快だった。我々は思っていた以上の仕事をした」と書いています。

最先端の科学、つまり放射能の解明をめざす彼の研究室のほとんど半数が、彼と研究するために海外からやってきた人達でした。そして彼らが、放射線と放射能の科学を、原子核の科学にまで発展させて行くのでした。

## 第 1 次大戦の影

1914 年 7 月 28 日、オーストリアはセルビアに宣戦を布告。これに対してロシアは総動員によってこれに応じ、ドイツは 8 月 1 日にロシアに、3 日にフランスに宣戦、4 日にイギリスがドイツに宣戦を布告。8 月末までにヨーロッパの総ての国が交戦状態に入ることになってしまいました。

この世界的規模の戦争は 4 年間も続くことになるのです。欧州を主戦場に、多くの近代兵器が使用され、一般国民をも巻き込んだ最初の総力戦でした。

科学者といえども例外ではありませんでした。総動員令が発せられ、否応なく前線へ向かうことになったのです。ナショナリズムの芽生えは、各国の知識階級にも深く浸透していたのです。祖国のため、正義のために尽く

すのが当然、という雰囲気でした。

1916年レントゲン車で働くイレーヌ・キュリー（17才）

フランスの場合も、例外ではありません。マリー・キュリーはポーランド生まれでしたが、フランスを祖国として、危機に瀕しているフランスのために力を尽くさなければならない、そう考えていました。

前線で負傷した兵士の治療のために、X 線の診断装置は欠かせない設備になりました。しかし当時フランスでは、レントゲン設備は、まだごく僅かの病院でしか利用されていなかったのです。彼女はそのことを知り、事態の改善に乗り出したのです。

放射線研究所や大学の研究室にあるX線発生装置を、病院の検査用に利用できるように働きかけ、研究者をその装置のオペレーターとして動員することに力を尽くしました。戦争が終結するまでに実現した放射線治療室は 200 に上りました。

そればかりではありません。恐ろしい数の負傷者が送られてくるのに、電源もない野戦病院すらあったのです。マリーはそのような現実にも立ち向いました。

フランス婦人協会の資金で、放射線治療車とでも言うべきものを初めて作りあげたのです。普通の自動車を改造して、レントゲン装置と、車のモーターで動く発電装置を設備したものでした。このようにして彼女の努力で実現したレントゲン車は 20 台にもなりました。彼女自身もそのうちの 1 台を駆って、率先して野戦病院の巡回を行っていたのでした。

傷ついた哀れな兵士たちの身体に食い込んだ、小銃弾や砲弾の破片の位置を放射線蛍光板上に写しだし、外科医に必要な指示を与えたのです。

普段の粗末な服のそでに赤十字の腕章をピンで留めただけで、研究所用の白い簡単なうわっぱりを着て、帽子もかぶらずに。そして 17 歳の長女のイレーヌも助手として参加するようになり、その後一人前のレントゲン技師として、殺伐とした陸軍病院での務めを果たしたのです。ノーベル賞を受けた母親と、後年またそれを授かる娘の、第 1 次大戦中の姿でした。

話はとんで、それから 80 年ほど後の、つまり 1994 年 1 月のことになります。彼女の遺体が夫ピエールとともに眠るパリ郊外のソー村から、 偉人廟のパンテオンに移される際に、フランス放射線保護局が測定した棺の内部の遺体からの放射線は、バックグランド数値より 1 桁高い値を示したそうです。しかし一般人の許容限度の20分の1でしかなかったということです。

そのことはキュリー夫人が吸い込んだラジウムの量は、致死量となるほどの量ではないということになるそうです。彼女は長年のラジウムの取扱いから白血病で亡くなったというのが通説でしたが、ラジウム 226 の半減期を考慮して、遺体の数値は少なすぎると言うことのようです。

そこで話題になったのが X 線被爆でした。第 1 次大戦の際の、彼女の X 線治療車での活動時の被曝が、彼女の身体を痛めつけていたというのです。

## 原子力時代の夜明け

戦争が終わるまで、どの国の科学者もそうであったように、自分の専門分野を離れて、戦争のための科学者として 4 年間を過ごさなければならなかったのです。

1918 年にドイツが降伏し、第一次対戦が終わりました。約 1000 万人の兵士や市民が戦闘で死亡、さらに 2000 万人が傷つきました。若くして前線で命を落とした、科学者もいました。しかし科学者達の放射線への好奇心は途絶えることなく続いていたのも事実です。わ

ずかな隙を見て前線から戻り、研究を続け発見を成し遂げた科学者もいたのです。

また研究の断絶が生じないように、自分たちの研究所を維持することに、必死で努力した科学者もいました。それが彼らの生きがいであり、生命も同然だったからです。

戦争の終わった翌1919年、ラザフォードがプラスの電荷をもつ原子核内粒子を発見し、陽子と名づけました。電子に対する正の電荷をもつ粒子が存在することは、予想はされていたのですが、ここに至るまで正確には捕らえきれていなかったというのが事実です。

原子核を構成すると考えられた二つの素粒子、電子と陽子は電荷をもっています。1932年に電荷を全くもたない素粒子が発見されました。ラザフォードの予言に基づいて、弟子にあたるチャドウィックが発見したのです。

それは電気的に中性でした。物理学者は電子や陽子に名づけたのと同じやり方で、この新しい粒子に中性子と名づけたのでした。この中性子の発見が間もなく 1938 年の原子核の分裂の発見につながることになるのです。

放射線についての一般の関心は、今日では原子力と密接に結びついていますが、放射線について科学者が理解するようになったのは、核分裂の発見に先立つ数十年も昔のことだったのです。つまりX線の発見がきっかけとなって、科学者達は、放射線に関する研究を、科学探求の一分野として推し進めたのです。

だから 1938 年の核分裂の発見を経て、1945年の原子爆弾の使用という形で、原子力時代が幕を開ける以前に、科学の世界では放射線の性質、効果について相当量の知見が蓄積されていたのは、当然のことでした。

そしてこの時代の研究を通じて、放射能と放射線は、自然界のいたるところに存在し、また生物が放射線場の中で進化を遂げてきたということが明らかになったのです。またその延長として、この宇宙の成り立ちや、その起源のあらましまでもが明らかになってきたのです。

科学は進歩しました。しかし人類社会は進歩を遂げたのでしょうか。第1次大戦で懲りたはずの文明国が、またもや第2次大戦を引き起こしたのでした。第2次大戦はもっと苛酷でした。すべての市民が戦争のために、なかでも科学者達は戦争技術の開発のために動員されたのでした。

科学者の間に国境が引かれ、学会もなければ、論文発表の自由もありませんでした。それでも科学者達は、最終兵器ともいえる原子爆弾の開発をさせたのです。第1次大戦では、その少し前に発見された放射線は、武器ではなく治療の手段として役に立ったのです。しかし人類は、懲りることもなく第2次大戦を勃発させ、ついには核分裂を兵器として産み落とさなければやまなかったのは、現代に生きる者の記憶に刻み込まれています。

来るべき未来に、原爆は人間の叡知でなくすことができるでしょう。しかし人類は、いや人類を含む地球上のあらゆる自然が、今後何万年も何億年も、天に満ち地に満ちた放射線との関わりのなかで、存在し続けるのです。

さて、悠久の時の流れはさておいて、放射線・放射能の発見100年という記念の時期に、その初期の科学者たちのエピソードを綴る物語は、この辺でひと区切りつけることとしましょう。

(完)

参 考 文 献

1) X 線からクォークまで、エミリオ・セグレ著、1982、みすず書房
2) 原子を飼いならす、ハンス・フォン・バイヤー著、1996、草思社
3) 電子と原子核の発見、スティーブン・ワインバーグ著、1986、日経サイエンス社
4) オットー・ハーン自伝、山崎和夫訳、1977、みすず書房

---

*放射線と産業、No. 75 (1997) 51 - 55 より転載（全8回連載分の第8回）

## 著者吉川秀夫氏の略歴及び著作等

略歴：

1959 年　国際基督教大学（ICU）卒　　日本原子力研究所、科学技術庁計画局、科学技術振興事業団、海洋科学技術センター、理化学研究所脳科学研究所など

1998－2000 年　有馬朗人文部大臣・政策担当秘書

著作等：

「科学は国境を越えて － ケリー博士評伝」1987 年、三田出版

「原子力 時代を先駆けた男達」1989 年、日刊工業新聞社

その他原子力科学史に関する著作多数

## 「放射線教育」巻頭言および編集後記執筆者

2018 年 3 月 31 日現在

| Vol. | No. | 年 | 発行年月 | 巻頭言執筆者 | 編集後記執筆者 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1997 | | 編集委員会 | 菊池文誠 |
| 2 | 1 | 1998 | | 阪上正信 | 小高正敬 |
| 3 | 1 | 1999 | 2000　3 | 今村　昌 | 中村佳代子 |
| 4 | 1 | 2000 | 2001　3 | 後藤道夫 | 坂内忠明 |
| 5 | 1 | 2001 | 2002　3 | 井口道生 | 小高正敬 |
| 6 | 1 | 2002 | 2003　3 | 高島良正 | 小高正敬 |
| 7 | 1 | 2003 | 2004　3 | 渡邊正己 | 坂内忠明 |
| 8 | 1 | 2004 | 2005　3 | 山寺秀雄 | 小高正敬 |
| 9 | 1 | 2005 | 2006　3 | 砂屋敷忠 | 坂内忠明 |
| 10 | 1 | 2006 | 2007　3 | 松浦辰男 | 村石幸正 |
| 11 | 1 | 2007 | 2008　3 | 河村正一 | 村主　進 |
| 12 | 1 | 2008 | 2009　3 | 長谷川圀彦 | 今村　昌 |
| 13 | 1 | 2009 | 2010　3 | 渡利一夫 | 細渕安弘 |
| 14 | 1 | 2010 | 2011　3 | 村主　進 | 堀内公子 |
| 15 | 1 | 2011 | 2012　3 | 中西友子 | 橋本哲夫 |
| 16 | 1 | 2012 | 2013　3 | 山寺秀雄 | 橋本哲夫 |
| 17 | 1 | 2013 | 2014　3 | 田中隆一 | 岩崎民子 |
| 18 | 1 (特集号) | 2014 | 2015　3 | 長谷川圀彦 | 工藤博司 |
| 19 | 1 | 2015 | 2016　3 | 野崎　正 | 工藤博司 |
| 20 | 1 | 2016 | 2017　3 | 工藤博司 | 柴田誠一 |
| 21 | 1 | 2017 | 2018　3 | 森千鶴夫 | 柴田誠一 |

# 「放射線教育」の投稿規定

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

NPO 法人放射線教育フォーラム発行の論文集「放射線教育」では、広く放射線教育に有益と考えられる内容の原稿の投稿を募集している。

1. 投稿資格

本誌への投稿資格は原則として NPO 法人放射線教育フォーラム会員 (個人正会員、学生会員、団体正会員、賛助会員)とする。「放射線教育」の内容及び体裁に合えば、会員は誰でも投稿できるものとする。ただし、編集委員会が認めた場合にはその限りではない。

2. 掲載する論文について

内容としては、放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われるもので、長さ、新規性により研究報告、ノート、解説、資料、意見、諸報に分かれる。詳細については別紙に定める。原則として未発表のものとするが編集委員会の判断によっては転載を認める。原稿の書き方は別に定める。

3. 原稿の審査

編集委員会は、論文の審査を複数の専門家に依頼する。その結果、内容・体裁に問題があると判断した場合にはその旨を著者に伝え、修正を求める。受理できないと判断した場合は、理由を明記して、報文を著者に返送する。

4. 論文の版権

掲載された論文の版権は放射線教育フォーラムに属するが、論文内容についての責任は著者にあるものとする

5. 原稿の送付

原稿は放射線教育フォーラム編集委員会に E-mail で、または CD あるいは DVD に記録し、下記に送付する。

（送付先） E-mail: forum@ref.or.jp

〒110-0015　東京都台東区東上野 6-7-2　萬栄ビル 202 号室
放射線教育フォーラム編集委員会

# 論文の分類

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

研究報告 (10 ページ以下)

結果と考察を含み、十分な意義があるもの

a) 放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる、独創性のある研究論文。実験、調査、比較研究なども含む、

b) 放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる教育実践の報告

c) 新規に開発した教材・実験方法・器具の報告

ノート (1~2 ページ)

a) 放射線の理論や現象に関する新規の解釈

b) 新規性の高い教材・実験方法・器具の報告

c) 新規な実験データ及び考察

d) 新規に考案した指導法、授業展開法、評価法など

e) 放射線教育、エネルギー・環境教育に関する授業実践、イベント実践の報告

総説 (10 ページ以下)

原則として編集委員会の依頼によるものとする。

各専門分野の研究について、その方面の進歩の状況、現状、将来への展望などを放射線教育若しくはエネルギー環境問題、放射線及び原子力問題に関連させてまとめたもの。

資料 (10 ページ以下)

実験ならびに調査の結果または統計などをまとめたもので放射線教育、エネルギー・環境教育に利用できるもの (含む科学史研究)

意見 (1~2 ページ)

放射線教育、エネルギー・環境教育、放射線に関する制度、教育制度などに関する種々の提案・意見など

諸報 (1~2 ページ)

a) 会議報告 (放射線、エネルギー・環境教育に関連する会議に参加した報告で、教育的価値が高いもの)

b) 訪問記 (放射線、エネルギー・環境教育に関連する施設に訪問若しくはイベントに参加した報告で、教育的価値が高いもの)

c) ニュース (放射線、エネルギー・環境教育、理科教育に関連するニュースの紹介)

d) 書評 (放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する書籍の紹介)

e) 製品紹介 (放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する製品の紹介)

f) サイト紹介 (放射線教育、エネルギー・環境教育に資するホームページの紹介)

# 「放射線教育」原稿の書き方

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

**1. 使用言語**

使用言語は日本語とする。

**2. 使用ソフト及び保存ファイル**

原稿はそのまま印刷できるように MS-Word（Microsoft）で作成する。他のソフトを利用した際は，doc ファイルで保存する。それができない場合は，文章を text ファイルで，図を JPEG 若しくは GIF で保存する。

**3. 用紙**

**3.1 用紙の設定**

用紙は A4 を用い，1 ページに 40 字 40 行，上下それぞれ 30 mm，左右それぞれ 25 mm 以上を空ける。意見，諸報は二段組にし，1 段に 17 字入れる。

**3.2 枚数制限**

研究報告，総説，資料は原則として 10 ページ以内にまとめる。ノート，意見，諸報は 2 ページ以内とする。別刷り作成に便利なように諸報以外は偶数ページの原稿となることが望ましい。

**4. フォント**

日本語のフォントは明朝体，英語は Times を用い，研究報告，総説，資料の場合，大きさは表題のみ 16 ポイント太字，その他は 10.5 ポイントとし，見出しは太字，本文は標準とする。意見，諸報は表題のみ 12 ポイント太字，その他は 10.5 ポイントとする。

**5. 図表**

図表のタイトルは太字とする。図は，図 1，図 2 と，表は表 1，表 2 と番号を振る。図表は上下左右のいずれかの欄に沿う状態で体裁を整える。図のタイトルは図の下に置き，表のタイトルは表の上に置く。表は縦線がない方が望ましい。

**表 1　図表の書き方**

| | 番号の振り方 | タイトルの位置 | Word に入らない時の保存形式 |
|---|---|---|---|
| 表 | 表 1，表 2…… | 表の上 | 表を送付し，TEXT あるいは DOC |
| 図 | 図 1，図 2…… | 図の下 | JPEG あるいは，GIF |

**6. 表題，要約及び見出し**

研究報告, 総説, 資料の場合, 1 ページ目の第 1 行目に表題, 2 行目を空けて, 3 行目に氏名, 4 行目に所属，5 行目に住所を書く。ここまでは各行の中央にそれぞれ記載する。6 行目，7 行目を空けて，8 行目から[要約] (50~200 字程度) をつける。所属が複数になる場合, 右肩にアルファベットを上付で付け, アルファベット毎に所属と住所をつける。

本文の大見出し, 中見出し, 小見出しは point system とし，1., 1.1, 1.1.1 等のように書く。

意見, 諸報の場合は, 要約を書く必要がない。

**7. 数値，単位，核種の表記**

数値は, 桁数が多くなる場合はなるべく 10 の乗数を用いる。

例：370000 Bq　→$3.7\times10^5$ Bq

単位は SI 単位を使用する。古い文献を引用するため，SI 単位以外の単位を用いなければならないときは，その単位を使用した後に， SI 単位に換算した値を示す。

例：検出された放射能は 1 nCi (=37 Bq) であった。

核種の質量数は $^{60}$Co, $^{131}$I のように元素記号左肩に上付きで表記する。

**8. 引用文献**

引用文献は番号に片かっこを付して本文の右肩につける。

引用文献は下の形式で原稿の最後に一括すること。ただし, 文献のタイトル記載については, 著者の判断に任せる。雑誌のタイトルは省略形を用いても構わない。

〔雑誌〕著者名，タイトル，雑誌名，**巻数**，ページ (西暦発行年)

日本語の論文の場合，著者は全員の名前を書くようにする。英語の論文の場合、名前はファミリーネームとイニシャルを用いる。ページは最初のページと最後のページをハイフンで結ぶ。

例) 坂内忠明，霧箱の歴史，放射線教育，**4**，4-17 (2000)

Ban-nai, T., Muramatsu, Y. and Yoshida, S. Concentration of $^{137}$Cs and $^{40}$K in edible mushroom collected in Japan and radiation dose due to their consumption. Health physics, **72**, 384-389 (1996)

〔単行本〕著者名，タイトル，編者名，「書名」，ページ，発行所，発行地 (西暦発行年)

タイトルと編者名はある場合のみ。

例) 松浦辰男，「放射性元素物語」，154p，研成社，東京 (1992)

渡利一夫，放射性セシウム，青木芳朗, 渡利一夫編，「人体内放射能の除去技術 : 挙動と除染のメカニズム」，7-10，講談社，東京 (1996)

**9. その他の注意**

1) 用語はなるべく各学会制定の用語を用い, 翻訳不能の学術語, 日本語化しない固有名詞に限り原語（活字体）のまま用いる。数字はアラビア数字を用いること。
2) 文献でない備考，注などは，*，**を右肩につけ，説明を脚注とし，その原稿用紙の下部に書くこと。

## 【編集後記】

当フォーラムでは、2011 年度から 30 年ぶりに復活した中学校理科の放射線教育を対象として、主に中学校理科における放射線授業を支援するため、教員と専門家や支援者が参加してのパネル討論会を開催してきました。今年度はその新たな試みとして、東京を離れて名古屋地区で、エネルギー問題と放射線授業にテーマを広げ、理科と社会科の連携という教科横断型授業に焦点を当ててパネル討論会を開催しました。このパネル討論会での講演からは、教育現場で放射線教育に悩みながらも真剣に取り組んでおられる先生方の思いが伝わってきました。そのホットな内容の一端は、この 3 月発行のニュースレター（NL-70）に掲載してあります。

本巻の「放射線教育を通して現代科学（素粒子、宇宙、量子論、相対論）に親しむ－新しい放射線教育の提案」（大野新一、大野玲著）の論文では、放射線発見の歴史、放射線の性質を通して現代科学に親しむことを目指す放射線教育が提案されています。放射線発見が、我々の身の回りで起こっている様々な現象の解明に対し、どのように大きな役割を果たしてきたかをみることができます。シンプルな装置を使っていかに重要な発見がなされたかにあらためて驚かされます。

さらに本巻では「放射線発見物語」（吉川秀夫著）を掲載しました。これは、レントゲンによる X 線の発見からちょうど 100 年後の 1995 年から 2 年間、8 回にわたって、「放射線と産業」誌（発行：放射線利用振興協会）に連載されたものを、許可を得て本巻に転載したものです。ここでは、19 世紀終わりからの放射線発見にまつわるエピソードが息もつかせない展開で紹介されています。X 線発見の前後の数十年間の出来事は、読者に科学の面白さ、その深淵なるものを伝えてくれることは間違いありません。

これらの掲載資料が教育現場で悩みを抱えておられる先生方ばかりでなく、放射線教育に関心をお持ちの方々にとって少しでも資することができれば望外の喜びです。

当期の編集委員会では、通常の「放射線教育」、「ニュースレター」の発行に加えて、2016 年 12 月に郡山で開催された第 5 回放射線教育に関する国際シンポジウムの要旨集、論文集の発行が大きな作業としてありました。これらの作業を皆様のご協力のもと大過なく（？）終えることができましたことを、この場をお借りして感謝申し上げます。

小生、2 年にわたり編集委員長を務めましたが、その役を新年度から緒方良至委員に引き継ぎます。今後も委員の一人として微力を尽くす所存ですが、「放射線教育」、「ニュースレター」の更なる充実には会員各位の協力が欠かせません。皆様からの積極的な投稿をお願いいたします。

(柴田誠一)

**放射線教育　Vol. 21, No. 1 (2017)**

発行日：　2018 年 3 月 31 日

発行者：　NPO 法人放射線教育フォーラム
URL: http://www.ref.or.jp

編集者：　柴田誠一（委員長）、工藤博司 (副委員長)、岩崎民子、大野新一、
大森佐與子、緒方良至、小高正敬、畠山正恒、細渕安弘、
堀内公子

事務局：　〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2　萬栄ビル 202 号室
NPO 法人放射線教育フォーラム
Tel: 03-3843-1070　　FAX: 03-3843-1080
E-mail: forum@ref.or.jp

# 放射線教育フォーラム
# 2017 年度活動報告


| | 頁 |
|---|---|
| １．NPO 法人放射線教育フォーラムの活動概要 | 1 |
| ２．NPO 法人放射線教育フォーラムの 2016･2017 年度役員名簿 | 2 |
| ３．通常総会、理事会、勉強会等の開催記録 | 3 |
| ４．放射線教育誌及びニュースレターの発行 | 5 |
| ５．第 5 回放射線に関する国際シンポジウム論文集（目次のみ） | 8 |
| ６．2017 年度教育課程検討委員会の活動報告 | 10 |
| ７．2017 年度草の根ＮＰＯ活動企画完了報告書 | 12 |
| ８．第 64 回全国中学校理科教育研究会北海道大会の概要 | 22 |

## １．NPO 法人放射線教育フォーラムの活動概要

NPO 法人放射線教育フォーラムは、放射線・原子力の専門家及び学校教員の有志によるボランタリー組織であり、1994 年 4 月に設立してから今年度で 24 年目を迎えた。その間に 2000 年 11 月に NPO 法人の認証を受けた。

当フォーラムは、2011 年に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故から 7 年を経過したが、その事故以前から多くの人々が放射線や放射能に対して過剰の不安感・不信感を抱いており、そのことがわが国のエネルギーの安定供給に関わるリスク認知を歪めている。さらには世間一般の人々が科学・技術の発展による便益を享受している一方で、生徒達に「理科離れ」、「理科嫌い」の傾向が見られる現状を憂慮している。

この現状を打開するために、当フォーラムは小中高の教育において、放射線・原子力・エネルギー・環境に関する適切な理解が啓発推進されるように、学習指導要領などの教育政策を改善するとともに、学校における放射線授業の支援に重点を置いて、勉強会、パネル討論及び国際シンポジウムを企画・開催している。また、専門委員会を設けて諸課題の検討をもとに文部科学省など関係当局への政策提言などの活動を行なってきた。

当フォーラムの会員数は、2018 年 3 月現在で個人正会員数 121 名、団体正会員数 29 団体である。福島原発事故の発生以後、原子力事業関係団体の団体会員の退会が急増した経緯がある。当フォーラムにとっては、団体及び個人会員の減少が直接に財政に影響を及ぼし、NPO 活動にとって危機的状況をもたらしかねないのが現状である。このような財政基盤の改善を図るためにも、団体および個人会員の勧誘に努力を重ねている。活気あるフォーラムを目指すためには、会員数の増強が重要である。

今年度の事業活動としては、小中高における理科と社会科をつなぐ授業づくりをテーマに、公開パネル討論「エネルギー・放射線教育 in 愛知」を、名古屋地域の当フォーラム会員諸兄の献身的な協力をもとに、11 月に名古屋大学で開催した。また、定常的な活動として、第 1 回及び第 2 回勉強会を 6 月及び 3 月に東京慈恵会医科大学アイソトープ実験研究施設との共催により開催した。今年度もこれらの催し全てが参加者に好評であった。

昨年度においては、第 5 回放射線教育に関する国際シンポジウム（ISRE2016）を 12 月に福島県郡山市の郡山商工会議所会館において開催し、専門家、放射線教育への支援者、台湾、タイからの参加者に加えて、教育現場の学校教員や一般市民などの参加も得て盛会であった。

専門委員会の活動については、「教育課程検討委員会」を今年度は 4 回実施し、主に高等学校理科教科書の放射線記述について検討した。

今年度の当フォーラム運営のための活動については、通常総会を 6 月に開催するとともに、理事会を 2 回開催した。円滑な運営を図るため、一昨年度から実施している「事務連絡会」を毎月 1 回定例的に実施した。

定期印刷物の刊行については、当フォーラムの機関紙である「放射線教育」Vol.21,No.1 を発行し、今年度活動の報告や活動に関わる参考資料を同誌の後付けとした。また、ニュースレターをこれまで通り 3 回（6 月、11 月、3 月）発行し、フォーラム設立以来の全号数は 70 に達した。

以上の活動は当フォーラムのホームページ（http//www.ref.or.jp）に掲載されている。トップページでは主要情報を「放射線教育 先生の広場」、「放射線学習支援資料」、「活動報告」、「出版物」、「放射線教育フォーラムとは」「GREETNGS IN ENGLISH」など 7 項目に分類・編集し配置した。

## ２．ＮＰＯ法人放射線教育フォーラムの 2016・2017 年度役員名簿

理　　事：（理事長）長谷川圀彦（静岡大学名誉教授）
（副理事長）工藤博司（東北大学名誉教授）
（副理事長兼事務局長）田中隆一（元日本原子力研究所高崎研究所長）
(以下五十音順)
大森佐與子（元大妻女子大学教授）
緒方良至（名古屋大学医学部保健学科）
小高正敬（元東京工業大学助教授）
柴田誠一（理化学研究所）
畠山正恒（聖光学院中学・高等学校）
堀内公子（元大妻女子大学教授）
吉澤幸夫（東京慈恵会医科大学）
渡部智博（立教新座中学･高等学校）

監　　事：朝野武美（元大阪府立大学先端科学研究所助教授）

名誉会長：有馬朗人（根津育英会武蔵学園理事長、元文部大臣、元東京大学総長）
会　　長：松浦辰男（立教大学名誉教授）

幹　　事：荒谷美智、大野和子、笠井篤、岸川俊明、菊池文誠、熊野善介、佐藤正知、下道國、関根勉、鶴田隆雄、中西孝、西尾信一、坂内忠明、宮川俊晴、村石幸正
顧　　問：飯利雄一、岩崎民子、河村正一、工藤和彦、黄金旺、黒杭清治、村主進、住田健二、野崎正、森千鶴夫、山口彦之、山寺秀雄、渡利一夫

## ３．通常総会、理事会、勉強会等の開催記録

２０１７年

４月１８日（火）第１回事務連絡会　　（フォーラム事務所、６名）
４月１８日（火）第１回編集委員会　　（フォーラム事務所、８名）
５月８日（月）第２回事務連絡会　　（フォーラム事務所、６名）
５月２０日（土）第１回理事会　　（フォーラム事務所、６名）
５月２８日（日）第１回教育課程検討委員会（フォーラム事務所、７名）
６月３日（土）通常総会（東京慈恵会医科大学、委任状含む出席者８５名）
６月３日（土）第１回勉強会　　（東京慈恵会医科大学、４２名）

（勉強会プログラム）

講演　教育課程検討委員会活動報告および今後の抱負
— 放射線リテラシー向上を目指して —
黒杭　清治　　放射線教育フォーラム教育課程検討委員会委員長

講演　放射線教育から学んだこと　— 東北放射線科学センターでの経験 —
工藤　博司　　東北大学名誉教授

講演　放射線教育支援サイト“らでぃ”と今後の展望について
掛布　智久　　日本科学技術振興財団

講演　現場に届く放射線教育コンテンツ支援プロジェクト
秋吉　優史　　大阪府立大学地域連携研究機構

総合討論

６月２０日（火）第３回事務連絡会　　（フォーラム事務所、６名）
７月１７日（月）草の根ＮＰＯ等活動第１回企画運営委員会（名古屋大学、１１名）
９月１０日（日）第２回教育課程検討委員会（フォーラム事務所、７名）
９月１１日（月）第４回事務連絡会　　（フォーラム事務所、５名）
１０月１０日（火）第５回事務連絡会　　（フォーラム事務所、１０名）
１１月１４日（火）第６回事務連絡会　　（フォーラム事務所、６名）
１１月２３日（木）公開パネル討論会「エネルギー・放射炎教育 in 愛知」　—理科と社会科の授業づくりを考える—」（名古屋大学東山キャンパス、９３名）

（公開パネル討論会プログラム）

実践報告　小学校におけるエネルギー教育について
— 教科横断型カリキュラムの開発と企業連携を通して —
今田宗孝　　春日井市教育委員会

実践報告　エネルギー関連施設を見学して感じたこと、子供たちに伝えたいこと
長崎寛之　　名古屋市立高田小学校

実践報告　科学を学ぶ意義や有用性を実感できる理科授業；放射線教育の視点から
加藤公士　　名古屋市立港北中学校

実践報告　社会科の視点からみたエネルギー教育
— 持続可能な社会の担い手としての意思決定力育成を見据えて —
岡崎正和　　公益財団法人愛知県教育スポーツ振興財団

実践報告　　理科＋αの放射線教育

大津浩一　　名古屋経済大学市邨高等学校

講演　　日本のエネルギーの課題と展望　― 次世代へ向けてのメッセージ ―

伊藤周広　　中部経済産業局資源エネルギー環境課長

パネル討論　理科と社会科から考えるエネルギー・放射線教育について

ファシリテーター：土屋武志　　愛知教育大学教授

１２月１７日（日）第７回事務連絡会（フォーラム事務所、６名）

１２月１７日（日）第２回理事会　　（フォーラム事務所、７名）

２０１８年

1月８日（月）草の根ＮＰＯ等活動第２回企画運営委員会（フォーラム事務所、８名）

1月１６日（火）第８回事務連絡会（フォーラム事務所、６名）

1月２８日（日）第３回教育課程検討委員会（フォーラム事務所、７名）

2月１３日（火）第９回事務連絡会（フォーラム事務所、６名）

2月１８日（日）第４回教育課程検討委員会（東京慈恵会医科大学、６名）

3月４日（土）第２回勉強会「クルックス管実験による放射線授業を目指して」

（東京慈恵会医科大学、６１名）

（勉強会プログラム）

講演　　新学習指導要領に対応した放射線教育推進のための方策

高畠　勇二　　全国中学校理科教育研究会支援センター

講演　　クルックス管など放電管の概要と漏洩Ｘ線測定の試み

森　千鶴夫　　名古屋大学名誉教授

講演　　教育現場におけるクルックス管の漏洩Ｘ線について

宇藤　茂憲　　福岡教育大学教育学部

講演　　クルックス管の安全な取り扱いとその課題

秋吉　優史　　大阪府立大学 放射線研究センター

授業実践に向けての総合討論　　座長：宮川 俊晴

3月１９日（月）第１０回事務連絡会　（フォーラム事務所）

## ４.「放射線教育」誌及びニュースレターの発行

### ４．１「放射線教育」誌　2017 Vol. 21, No. 1

【巻頭言】　当フォーラムの誇りと悩み　　森千鶴夫　　（名古屋大学名誉教授）

【資料】　放射線を通して現代科学（素粒子、宇宙、量子論、相対論）に親しむ
　　－新しい放射線教育の提案－
　　大野新一、大野　玲　　（理論放射線研究所）

【資料】　特集 放射線発見物語　　吉川秀夫（元海洋科学技術センター）
　　第１回　見えない光を求めて
　　第２回　世紀のＸ線フィーバー
　　第３回　ウランとその放射線の発見
　　第４回　電子をとらえた
　　第５回　α線、β線、そしてγ線
　　第６回　Ｎ線は存在しない
　　第７回　天にも地にも放射線
　　第８回　原子力時代の夜明け前

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方

編集後記　　柴田誠一　　（放射線教育フォーラム）

### ４．２　ニュースレター

**ニュースレター No. 68　2017. 6**

巻頭言　低線量放射線と人間のかかわり　　大森佐與子　　（元大妻女子大学）

UNSCEAR2016 - 異なる電力生産に伴う被ばく線量比較 -
　　岩崎民子　　（元放射線医学総合研究所）

【学びを語る】放射線教育 怖がりすぎず、判断する知識を（朝日新聞 2017 年 4 月 24 日）
　　田中隆一　　（放射線教育フォーラム）

廃止措置等に向けた放射線安全関連分野の人材育成の必要性について
　　近藤健次郎　（高エネルギー加速器研究機構名誉教授）

教育分野における放射線測定器等の使用の現状と今後の展開について
　－(株)千代田テクノルの経験をふまえて－　　谷口和史　　（株式会社 千代田テクノル）

放射線から見た高校物理の現状　　広井　禎　　（元筑波大学附属高校）

平成 29 年度放射線教育フォーラム通常総会及び第 1 回勉強会（開催案内）

みんなで作ろう「放射線かるた」!!　　堀内公子　　（放射線教育フォーラム）

編集委員退任に当たって　　菊池文誠　　（元東海大学理学部）

放射線教育フオーラムと今村昌先生　　渡利一夫　　（放射線教育フオーラム）

会務報告

原稿募集案内（ニュースレター、放射線教育）
編集後記　大野新一　（放射線教育フォーラム）

**４．２ ニュースレター No. 69　2017. 11**

巻頭言　放射線教育の難しさ　村石幸正　（中央大学理工学部）
教育課程検討委員会活動報告および今後の抱負　－放射線リテラシー向上を目指して－
黒杭清治　（放射線教育フォーラム）
放射線教育から学んだこと　－私の経験－
工藤博司　（東北大学名誉教授）
放射線教育支援サイト“らでぃ”と今後の展望について
掛布智久　（日本科学技術振興財団）
「現場に届く放射線教育コンテンツ支援プロジェクト」
秋吉優史　（大阪府立大学 放射線研究センター）
被ばく軽減に配慮した放電実験　高畠勇二　（全中理支援センター　代表理事）
幌延深地層研究センターを見学して　中山知恵子　（神奈川大学付属中・高等学校）
第 64 回全国中学校理科教育研究会北海道大会の概要
宮川俊晴　（放射線教育フォーラム）
公開パネル討論会の開催案内「エネルギー・放射線教育 in 愛知」
－理科と社会科の授業づくりを考える－
講演者プロフィール、講演要旨
平成 29 年度総会報告（活動計画書、貸借対照表、財産目録）
会務報告
原稿募集案内（ニュースレター、放射線教育）
編集後記　堀内公子　（放射線教育フォーラム）

**ニュースレター No. 70　2018. 3**

巻頭言　次なる一歩を目指して！！（案）　宮川俊晴　（放射線教育フォーラム）
小学校におけるエネルギー教育について
－教科横断型カリキュラムの開発と企業連携を通して－
今田宗孝　（春日井市教育委員会）
エネルギー関連施設を見学して感じたこと、子供たちに伝えたいこと
長崎寛之　（名古屋市立高田小学校）
科学を学ぶ意義や有用性を実感できる理科学習　－放射線教育の視点から－
加藤公士　（名古屋市立港北中学校）
社会科の視点からみたエネルギー教育
－持続可能な社会の担い手としての意思決定力育成を見据えて－

岡崎正和　（愛知県教育・スポーツ振興財団）
理科＋αの放射線教育　大津浩一　（名古屋経済大学市邨高等学校中学校）
平成 29 年度放射線教育フォーラム第 2 回勉強会（開催案内）
放射線教育フォーラム「ニュースレター」巻頭言および編集後記執筆者一覧（Vols. 1 - 70）
会務報告
原稿募集案内（ニュースレター、放射線教育）
編集後記　畠山正恒　（聖光学院中学・高等学校）

## ５．第５回放射線教育に関する国際シンポジウム論文集（2017 年 7 月発行）
（目次のみ）

## *Proceedings of the Fifth International Symposium on Radiation Education ISRE2016*

**Preface ---------- Kunihiko HASEGAWA**

**Contents**

**□. Keynote Lecture**

**1.1. Necessity of Education on Radiation and Radioactivity in Japan ---------- 1**
Akito ARIMA

**1.2. How to Explain Radiation Health Risk to The General Public: Lessons Learned from Chernobyl and Fukushima Nuclear Power Plant Accidents ---------- 10**
Shunichi YAMASHITA

**1.3. The Nuclear Energy Education in Taiwan ---------- 15**
Keh-Shih CHUANG

**□. Oral Presentation**

**2.1. Patient-Specific Radiopharmaceutical Time Activity Curve Estimation Using External Thermoluminescent Dosimeters ---------- 19**
Hsin-Hon LIN, Cheng-Chang LU, Shang-Lung DONG, Yu-Ching NI, Meei-Ling JAN, and Keh-Shih CHUANG

**2.2. Risk of Natural Radiation of Japanese ---------- 26**
Michikuni SHIMO

**2.3. Nuclear Technology Education at the Secondary Level in Thailand ---------- 31**
Thanakit LERDLU, Chuntana BOONMARK, Prayong PIYANART, Surat CHUMTHONG, Mutita AODTON, and Khawee SUNTHORNOWARD

**2.4. Radiation Education and Nuclear Power Plant in Taiwan ---------- 35**
Chin-Wang HUANG

**2.5. An Example of Lectures on the Nature of Radiation for General Public ---------- 39**
Hiroshi KUDO

**2.6. Radiation Education Experiments and Other Science Education Experiments with a Handmade GM Counter ---------- 48**
Chizuo MORI

**2.7. Development of Radiological Educational Program Using a Peltier-Cooling-Type High Performance Cloud Chamber ---------- 54**
Masafumi AKIYOSHI, Hirokazu ANDO, Yasuki OKUNO, and Hiroto MATSUURA

**2.8. Utilization of Small $^{68}Ge/^{68}Ga$ Generators as Experimental Tool in Wide Fields of Education ---------- 63**
Tadashi NOZAKI and Toru SASAKI

## □. Poster Presentation

**3.1. Detection of Spatial Distribution of Dual Photon Emitters Using TOF Coincidence Imaging Technique with Stochastic Origin Ensemble Approach ---------- 67**
Chih-Chieh CHIANG, Keh-Shih CHUANG, and Hsin-Hon LIN

**3.2. Post-311 Promotion Activities for Science & Disaster Literacy of Citizenry and School Students by Means of 'Bulletin', Symposium, and Summer School ---------- 72**
Haruko NIHON'YANAGI, Tomie ISHIKAWA, Toshie KIKUCHI,
Toshi MATSUMOTO, Sachiko SAWAYA, Setsu OKAYAMA, Kaoru ENDA,
Kinue KANAZAWA, Hiromi TODOROKI, Kayoko YOKOYAMA,
Harumi OKUKAWA, Teruko UENO, Eiko NAKAYAMA, Kiriko MIYAMOTO,
Chikako ISHIKAWA, Hiroko HIRANO, Nobuko KUMANO, and Michi ARATANI

**3.3. Mystery of Alpha Particle Track in Cloud Chamber! ---------- 77**
Chizuo MORI

**3.4. The Image of Alpha Emitter Distribution on the Surface of Environmental Material with CR-39 ---------- 83**
Chizuo MORI

**3.5. Analysis of the Consciousness of University Students in Okinawa about the Radiation ---------- 88**
Nanaho SAKASHITA and Eisaku HAMADA

**3.6. Development of Teaching Materials for Radiation Education Using CR-39 ------ 94**
Yumeto NAKAHODO and Eisaku HAMADA

**3.7. HATO Project / Practice of Radiation Education through Partnership of Teacher Education Universities ---------- 99**
Kazuko ONISHI, Akio HIRATA, and Masahiro KAMATA

**3.8. Effects of the Thoron Spa or Bath on the Anaplastic Carcinoma of Thyroid ---- 103**
Kimiko HORIUCHI, Atsuhiro KISHIMOTO, and Koji YAMAMOTO

## Appendix

**Author Index ---------- 107**
**ISRE2016 Photo ---------- 108**

## ６．2017 年度教育課程検討委員会活動の記録

委員長　黒杭　清治

### 1. 設立趣旨（設立当時の趣旨）

放射線の内容は学校教育（初等中等教育）のいろいろな教科・科目で取り扱われ、一部では効果的な実験も発表されているが、大部分は取り扱いが断片的で、学習指導の時間は少ない。また、放射線の重要性や利便性に反して、一般には怖い、危ないなどの危険性の印象が定着している。

これらの現状を鑑み、誤った知識を是正し、市民としての素養に不可欠な放射線についての事項を、どのように学校教育の中に組み込むかを検討するため、1998 年 8 月に本委員会が設立され現在に至っている。

### ２.委員名簿(2017 年度)

| | | |
|---|---|---|
| 相談役 | 山寺　秀雄 | 名古屋大学名誉教授 |
| 委員長 | 黒杭　清治 | 元芝浦工業大学教授 |
| 委　員 | 大津　浩一 | 名古屋経済大学市邨高等学校･中学校 特任教諭 |
| 同 | 田中　隆一 | 元日本原子力研究所高崎研究所長 |
| 同 | 広井　禎 | 元筑波大学附属高等学校副校長 |
| 同 | 村石　幸正 | 中央大学理工学部 特任教授 |
| 同 | 渡部　智博 | 立教新座中･高等学校教諭 |

### ３．活動経過と成果

#### (１)前年度までの活動と成果

1998～2007 年度　資料収集・調査活動

教員、および小中高校生･大学生の放射線に関する知識･意識調査(アンケート等)。

『児童・生徒の放射線リテラシー育成のための指導資料集』４章構成の制作

2008～2009 年度　中学校理科新学習指導要領の内容検討と放射線学習計画制作

「中学理科新学習指導要領に沿った放射線教育の先行的実践記録」

関東・信越地区(2)エネルギー・環境・放射線セミナーで発表

2010 年度以降　下記放射線教育 PPT 教材の制作、HP へ公開

**授業ですぐに使えるパワーポイント**

１．原子構造と放射線の基礎　　２．自然界の放射線

３．放射線の性質と利用　　４．放射線医療　５．ウリミバエの撲滅

６．放射性炭素年代測定法の種明かし　７．ヨウ素 131 の半減期

**福島原子力事故から何を学ぶか**

第 1 部原発事故による健康への影響　　第 2 部原発事故は防げるか

第 3 部未来のエネルギーを考える　　第 4 部「住民が受けた原子力災害」

2015 年度以降　理科教科書の放射線に関わる記述の検討

2015 年度　中学校理科教科書の検討

2016 年度　同上の継続　及び　東京書籍･学校図書と中学校校理科放射線に関わる記述についての意見交換を実施

#### (２)2017 年度の目標と活動

(2)-1　目標：

①高等学校新教科書「物理基礎」の放射線に関わる記述の検討。

②PPT 教材の継続制作　③教科書会社との意見交換会の実施

(2)-2　活動内容

**(2)-2-1 教育課程検討委員会**を下記の日の 13:00～16:00 に事務所で 4 回開いた。
大部分の時間を高等学校新教科書**「物理基礎の放射線に関わる記述の検討」**にあて、教える内容が中学校での既習内容の繰り返しにならないように、何をどのように教えるかを決めることに重点を置いた。検討する同一出版社の教科書は、レベルの高い方を選んだ。

**第１回**　2017 年 5 月 28 日（日）数研「改訂版物理基礎」対する大津委員の意見を検討
**第２回**　2017 年 9 月 12 日（日）検討教科書を数研・東書・第一・啓林・実教に拡大。
**第３回**　2018 年 1 月 28 日（日）廣井委員提出の「放射線の特徴・単位」について検討
第４回　2018 年 2 月 18 日（日）来年度第 1 回勉強会（6 月 10 日）での当委員会活動報告を廣井委員にお願いした。また、併せて「物理基礎はかくあるべし（仮題）」との意見発表を行ってもらうことをお願いし、廣井委員が用意した資料について検討した。

**(2)-2-2-1　上記以外の検討事項**（用語などの検討内容は省略　会議録で保存）
**▼「物理基礎」の教育目標は何か**：「選択受講者の大多数が“物理”を選択せずに卒業するので、社会人として物理の知識を使って“考えられる”能力を養いたい（大津委員）」という考えと、「物理”を気軽に教える教科にしたい（村石委員）」と言う対極の考えに分かれたが、基本的には学習指導要領の目標科学の基礎的な素養を身に付ける点では共通している。
**▼“物理”の記述を“化学の目”で見る**と、意味の違い（対比）を明確にする必要を感じる（渡部委員）。例えば◎原子構造を、化学では原子核だけ示すことはない（化学変化は核外電子の組み換え反応）◎化学反応と原子核反応でのエネルギー出入りは桁違い、◎化学での“電離”は電解質が水溶液中で陽・陰イオンに分かれることであり、電離作用とは言わない。これらの対比は、本質を正しく理解するうえで重要であるが、教科書にはその説明が見られない。これらを渡部委員提出の資料で検討した（結果発表の場が欲しい）。
▼中学校では電離作用の意味を暗記させるだけだが、高校では一歩進めて、電離を起点に、物理的、化学的、生物的作用（or 効果）へ発展させ、放射線影響や放射線利用への理解に繋げられると良いが、他教科との連携が必要になる。

**(2)-2-2-2「放射線教育の教科横断的授業」をテーマにした勉強会実施の要望**
放射線の身体への影響は一般市民が最も関心を示す事項であるが、「物理教科」での取り扱いは無いか、あっても不十分。化学・生物・保健・社会科などと連携した授業が必要である。**文科省は**前年度パブコメ 39 現代的な諸課 題等に対し、『資質・能力を教科 横断的に育む旨を規定する・・・』と応えている。たまたま大津委員が来年度第 1 回勉強会（6 月 10 日）で市邨高校での放射線教育の、社会科との教科横断的授業実践を報告するので、この機会にその他の教科との教科横断的授業実践をテーマにした勉強会に発展できると良い。今からでは準備不足で無理かもしれないが、時間を掛けても計画を立てて、いつか実践してもらいたい。

**(2)-2-3「放射線リテラシー集」改訂のための検討（昨年度からの継続）**
**改訂に必要な基礎資料の収集**
① 2015・16 年度に当委員会が作成した**『平成 28 年度中学校 3 年理科教科書の放射線に関する記述の検討』**
② 大日本図書に要望書を提出。それを基に**2018 年 2 月 19 日（月）意見交換会**を実施
出席者　編集局次長中村潤　中学校理科編集長都筑誠　中学校理科佐々木智恵子
フォーラム側　田中　隆一　廣井　禎　宮川　俊晴　黒杭　清治（以上７名　敬称略）
提出した要望書、および当日追加した意見等は改訂資料として好意的に受入れられた。
③ HP に掲載した放射線学習支援資料（**PPT 教材**）の**制作**を継続する。

**（３）来年度の目標**　本年度の目標を継続し、改訂放射線リテラシー作成の資料にする。
**①教科書会社との意見交換会**　本年度までに実施できなかった啓林館、教育出版に要望書を提出し、順次開催したい。
**②**高等学校新教科書**「物理基礎」の放射線に関わる記述の検討**と資料作成を引続き継続。
**③PPT 教材の制作**：「放射線の単位」「低線量放射線の健康への影響」「霧箱」（仮題、担当大津）「宇宙線」「放射線の検出と測定」の完成を目指して継続制作。　（文責　黒杭）

## ７．2017年度草の根ＮＰＯ活動企画完了報告書

**草の根ＮＰＯ活動企画完了報告書**

提出年月日：平成３０年１月３１日

| | |
|---|---|
| 団体名 | ＮＰＯ法人放射線教育フォーラム |
| 所在地 | 〒110－0015東京都台東区東上野<br>６－７－２ 萬栄ビル202号室 |
| 担当者名 | 田中　隆一 |
| 連絡先 | TEL:　027-251-4825(田中隆一自宅)<br>FAX:　同上<br>Eメール:　ryutnk@kra.biglobe.ne.jp |

１．企画のタイトル

愛知県におけるエネルギー・放射線理解促進活動

２．実施の目的

７年前の3．11福島第一原子力発電所事故及び教科の縦割りを越える平成２８年度の小中学校の学習指導要領改訂を踏まえて、わが国におけるエネルギーに関する学校教育の方向性が明確に示されたことにより、先進的なエネルギー教育モデル支援事業等の開発、様々な教材や学習プログラムの開発がすでに進みつつある。しかし、エネルギー・放射線授業を広く普及していくためには、そうした開発事業と並行して、教育現場へ側面からの支援活動が必要である。

これまで約20年間、当フォーラムは放射線・原子力を中心にエネルギー・環境に関わる理解促進に努めてきた。3．11事故後は、学校現場での放射線授業に対するためらいととまどいに対処して、4年間にわたって放射線授業実践のためのパネル討論、勉強会の催しなどを通して、教員同士並びに教員と支援者の間の意見交換や経験共有の活動を積み重ねてきた。本活動を通して、全国各地域で放射線授業に意欲的に取り組んでいる主に中学校理科教員とのネットワークを形成するとともに、中学校３年間の理科教育で段階的に積み上げる放射線授業プランを提案し、一連の事業成果を収めることがで

きた＊（補足資料１）。

本年度は、上記の授業支援実績を活かして、放射線授業だけでなく、原子力を含むエネルギー授業をテーマとして、支援活動の対象を中学校から小学校と高等学校に広げるとともに、理科と社会科の教科横断型の授業を考えていきたい。加えて、これまでの活動拠点であった東京から一歩踏み出して、同様な大電力消費地域である愛知県における授業実践に関わる支援事業に取り組む。

今回企画している公開パネル討論会では、電力消費圏である名古屋市を中心に愛知県における学校現場で、いま、どのようなエネルギーに関する授業（放射線も含めて）が実践され、どのような課題を抱えているかという視点から、まず理科及び社会科授業についていくつか実践報告をしていただく。そのうえで、資源エネルギー庁よりわが国のエネルギー事情の現状に関する基調講演をしていただく。それを授業実践に結び付けてパネル討論を実施し、今後の授業のあり方についての教員同志の間で、並びに、教員、専門家及び一般市民の間で意見交換を行う。

＊ 田中、宮川：「新教科書による中学校での放射線授業実践の支援」，エネルギー環境教育研究 Vol.11,No.2,77-82(2017)

３．実施内容Ⅰ（事業の概要、企画運営委員会の設置、実施経過）

１）事業の概要

催事名：　エネルギー・放射線教育in愛知
開催日時：　１１月２３日（木・祝日）１３:００～１７：３０
開催場所：　名古屋大学東山キャンパス工学部 IB011 講義室
テーマ：　小中高におけるエネルギー・放射線授業支援
催事形式：　実践報告、講演及びパネル討論の三部構成
実践報告：　５件（高校教員１、中学校教員２、小学校教員２）
基調講演：　１件（テーマはわが国のエネルギー政策について）
　中部経済産業局資源エネルギー環境課長　伊藤周広氏
パネル討論　パネリスト　：実践報告者、講演者
　ファシリテータ：愛知教育大学教授　土屋武志氏
募集対象：　教職員、一般市民、エネルギー・放射線関係専門家など
募集人数：　１００名　（参加者９３名）
ブース展示：　９件
周知方法：　当フォーラムのホームページ掲載、会員メール配信システ

ム、関係する学協会のメール配信システム、及び個人的なネットワークを活用

２）企画運営委員会の設置

委員はすべて当フォーラム会員とする。会合を２回実施。

委員会メンバー　石井正則（原子力学会シニアネットワーク）
緒方良至（名古屋大学アイソトープ総合センター）
神谷均（中部原子力懇談会）
羽澄大介（名古屋市教育センター研修部）
畠山正恒（聖光学院中学･高等学校）
宮川俊晴（放射線教育フォーラム）
森千鶴夫（名古屋大学名誉教授）
渡部智博（立教新座中学･高等学校）

３）実施経過

① 事務局案を練るための予備的な調査（７月４日、名古屋、補足資料２）
② 第 1 回企画運営委員会（７月１７日、名古屋大学）。事務局案をもとに、開催スケジュール、催事の形式、会場、実践報告者、基調講演者、ファシリテータ等の選定を含む開催計画を検討（補足資料３）
③ 企画運営委員に加えて名古屋圏在住の会員などで構成する名古屋世話人グループを形成（７月）
④ 会場は名古屋大学東山キャンパス内の工学部の講義室を借用することに決定（７月）
⑤ 小中高校の実践報告者を決定（７～８月）
⑥ 基調講演者及びファシリテータを決定（８月）
⑦ 実践報告と講演の内容を踏まえて、授業実践につながるようなパネル討論を効果的に導くため、パネル討論企画グループを設置し、小中学校の教育関係者及び教育現場を熟知しているファシリテータ（教育系大学教授）と相談しながら、パネル討論のシナリオ作りを進行（８～１１月）。
⑧ パネル討論の準備打合せ（８月１０日、愛知教育大学、補足資料４）
⑨ 実践報告者及び講演者への事務局からの依頼手続き（８～９月）
⑩ 開催趣旨、開催概要及びプログラムで構成される公開パネル討論会の開催案内を確定（９月、補足資料５）。　催事タイトルを事務局案から以下のように変更
「エネルギー・放射線教育 in 愛知
― 理科と社会科の授業づくりを考える ―」
⑪ パネリストを参加者に簡明に紹介するためのプロフィールを作成（９月、補足資

料６）

⑫　公開パネル討論会の周知：開催案内などを当フォーラムのホームページに掲載するとともに、会員へメール配信、参加者募集（教員、専門家、一般向け、９月～１１月）

⑬　ブース出展の企画：名古屋世話人グループが会場に隣接するスペースを利用して放射線やエネルギーの学習教材等を展示する９件のブース出展を企画（９～１１月、補足資料７）

⑭　名古屋世話人グループと事務局の合同による催事会場の実地調査をもとに、開催運営のための準備会合を実施（１０月９日、名古屋大学、補足資料８）

⑮　参加申込受け付け、講演者との事務手続き、会計業務、配布資料準備、当日開催運営、事後処理などに関する事務局での準備会合を適宜実施（１０～１１月）。

⑯　実践報告、講演等のパワーポイント資料をはじめとする参加者への配布資料の収集、作成、印刷等の業務（１１月、当フォーラムの団体会員が印刷に協力、補足資料９）

⑰　アンケートフォームの作成・印刷（１１月、補足資料１０、１１）

⑱　催事実施の詳細スケジュール、開催前日及び当日の作業分担・手順等（事務局世話人会議）

⑲　催事当日の開催運営（１１月２３日、補足資料１２、１３、１４、１５）

⑳　催事総括に関する事務局会合（１２月１７日）

㉑　参加者確認及びアンケート調査結果の集計・分析（１２月、補足資料１６、１７、１８）

㉒　第２回企画運営委員会の開催（１月８日　フォーラム事務所）。実施結果やアンケート回答分析の結果、自己評価、今後に向けて、などに関して議論（補足資料１９）

４．実施内容Ⅱ（パネル討論進行シナリオ）

今回のテーマである、新しい授業実践の在り方のように、論点が会場参加者の間であらかじめ共有されていないテーマでは、パネル討論の議論が散漫に流れやすいので、フロアの参加意識を高め密度の濃い討論とするために、以下のような進行シナリオを実践した。

１）　パネル討論の準備段階で名古屋市内の教育関係者により、実践報告・討論のポイントの意見交換を重ね、小学校理科・社会科、中学校理科・社会科、高校理科の実践報告者を選任した。

２）　申し込み時に質問票を設け、事前に参加者の興味・関心の把握を行うことにした結果、２名からの質問を得て、パネル討論の冒頭で回答することにより、会場参加意欲の向上を図った。

３）　パネル討論において実践報告者や講演者とフロアの意見交換を効果的に行うため、講師によって色分けされた質問票を前もって参加者に配布し、実践報告が全て終わった後の休憩時間中に記入された質問票を回収した。色分けされた実践報告者への質問票は、次のエネルギー政策に関する講演時間を利用して分類・集約し、実践報告者がパネル討論の場で効率的に回答する準備を実施した。これによって、より多くの参加者の声をパネル討論に効率的に反映させることができた。

４）　開会直前の短い時間を利用してパネリスト、ファシリテータ及び主催者が顔合わせを兼ねた事前打ち合わせを行った。これによって、実践報告者全員が議題や時間についての共通意識を持ち、スムーズな意見交換を実施できた。

５）　パネリストプロフィールの会場配布により講師紹介などの時間を省略した。

６）　教科横断型の教科や校種の違いを越えた教育実践の推進、外部組織との協力による社会に開かれた教育実践など、カリキュラムマネジメントの視点での議論を行った。

５．企画の効果（募集結果、実践報告者の感想、アンケート調査結果）

１）　参加者募集の結果について

参加者募集の目標を１００名と敢えて高く設定したが、講師等も加えた来場者数は９３名となり、参加登録をしていないブース出展関係者を加えることで、目標をほぼ達成したと考える（補足資料１２）。

今回の際立った特徴は現役教職員の参加者が４２名に達し、参加者数の４割を超えたことである。これはこれまでの教職員参加の実績を遥かに越えている。教職員参加数の内訳は小学校（ＯＢを含む）１６名、中学校（ＯＢを含む）１８名、高等学校６名、校種不明２人であった（補足資料２０）。

２）　実践報告者の感想（補足資料２１）

実践報告した先生方からの事後感想・意見は以下の通りであった。

（１）エネルギー教育について

① エネルギー教育は重要であり、教師がまず自ら学ぶことが必要である。

② 国内の原子力関連施設の見学は、エネルギー産業の現状を理解するうえで大いに有効である。

③ エネルギー教育は、小学生の段階でも可能であり、きちんとした情報に基づく授業をなせば、中学校では公民としての意識を持ち、議論し、自分の意見を発

信することも可能となる。

④ 児童・生徒が日本のエネルギーの現状を知る機会は少なく、その機会を得るためにもエネルギー教育が必要である。原子力発電の $CO_2$ 削減効果が大きいことや、大量の化石燃料の輸送にはリスクがあり、日夜大きな努力が払われていることは知られていない。

⑤ エネルギー教育では、電気の利用などエネルギーと自分たちの生活とのかかわりに触れて、自分たちの身近な課題であることを理解することで、主体的に学んでいくことができる。

⑥ 放射線に関しては、身近で大いに活用されていることを理解すると生徒の関心が高まり、自ら学ぶ意識が向上する。

⑦ エネルギー企業との連携も先生が全体の構想をもってリードし、役割分担を明確にすれば生徒の意欲も高まり十分効果があるうえに、社会に開かれた教育を実施できる。

⑧ 小学校の総合の時間での授業実績から社会科、理科、家庭科の教科横断型モデル授業が提案できた。

⑨ 電力会社の日頃、原子力のトラブル情報が多いなかで、原子力のメリットの情報が少なく、原子力を廃止するデメリットやメリット、デメリットを比較する教材の開発が望まれる。

⑩ 教科横断型の授業は、内容的にも広がりが生まれ、深く理解することに非常に有効である。

（２）今後への取り組み・要望

① このような現場経験を交流する場を継続的に確保して欲しい。会場からの意見も自分の授業計画の見直しや考えていたことを整理する良い機会となった。

② 原子力発電も化石燃料発電等も公平に児童・生徒が自発的に学び・考えるエネルギー教育に取り組んで行きたい。

③ リスクとハザード、原子力発電と放射性廃棄物の処分は分けて考える必要があることなどを理解した。専門家と一緒に授業作りができたら、より良いものができると感じた。

④ 先生方が原子力やエネルギー事情を知る研修の機会を設けたい。

⑤ 社会科と理科の先生が連携授業を実施するために、共同での教材作成が重要である。

⑥ 電力会社の小中学校教員向け図解集【「電気」「エネルギー」をテーマとする授業のための図解集～アクティブ・ラーニングの展開に向けて～】は、活用できる部分は活用するが、不十分な点は改善していくことが必要だと思っている。多くの先生が活用するには、放射線や原子力に対してオープンに話せる環

境作りが必要と感じている。

⑦ 懇親会でも、教材の提案など様々有益な情報交換が出来た。

３）　アンケート調査結果について

企画の効果を把握するため、参加者を対象とするアンケート調査を行った。回答率を向上するために、アンケートフォームは、回答が容易なシンプルな設問に限定した。その結果、講師以外の参加者８４人のうち、５０人の参加者から回収され、６０％の高い回答率となった。年齢別にみると、回答者の半数以上が４０歳代以下であり、過去の調査と比べて若年層の割合が高い傾向を示した。これは、参加した教職員が、原子力・放射線関係の団体や大学・大学院、専門学校等の参加者に比べて平均年齢がかなり低く、かつ回答率が高かったためである。

三択の有益度評価では、各実践報告、講演、パネル討論のどれについても、半数以上が「大いに有益」であった。特に名古屋経産局の伊藤周広氏の講演は９割に及んだ。「ある程度有益」を含めると、実践報告と講演は９割以上の評価、パネル討論については約８割の評価となった（補足資料２１、補足資料２２）。

有益度評価の理由及び全般への意見の記述傾向から、おおざっぱに読み取れたことを以下に列記する。

① 当フォーラムがこれまで主催した公開パネル討論会において、これほど多くの教職員から評価理由や意見をうかがえたのは今回が最初である。教職員による評価理由の記述が多かったことも今回の特徴であり、理科と社会科のエネルギー教育の授業実践への関心度の高さを示していると考える。今後の支援活動に役立てたい。

② 今回の催しは異なる校種や異なる教科の教職員が一堂に会して授業実践をテーマに議論したことが、これまでにない新しい試みと言える。意見記述の内容は様々であったが、結果的には参加者の有益度評価が高かったことから、総じてこの試みが参加者にプラスの刺激となったことがうかがえる。

③ 伊藤周広氏のエネルギー政策に関する講演が最も評価の高かった理由は、教科書などに地球規模での環境適合性について多くのスペースが割かれていても、日々の生活に直結するわが国のエネルギー事情はあまり取り上げられていないためではないかと考える。中部地域のエネルギー政策の特徴に触れたことも評価を高めたと考える。「行政の立場から話を聞く機会がないので、もう少し講演時間が欲しかった」という意見もあった（補足資料１７）。パネル討論の後の懇親会では、伊藤周広氏が若い先生方の熱い輪に囲まれている光景が見られた。

④ パネル討論については、会場からの事前質問への回答などを通して実践内容の細

部の説明を受けることができたこと、質問者への再質問の場面もあってパネリストと参加者の理解が深まったこと、様々な立場からの話を聞くことができたことなども評価されたと考える。その背後で、パネル討論のシナリオづくりにきめ細かい配慮がなされていたことや教育現場を熟知したファシリテータによる討論の進行がスムーズであったことを強調しておく。

６. 実施後の評価（自己評価）

１）エネルギー・放射線教育の視点からの評価

①公開パネル討論会の望ましいかたちは、エネルギー・放射線授業の先導的な実践者の第１グループ、専門家・支援ボランティアの第２グループに加えて、授業実践に取り組もうと自ら考えている多くの先生方の第３グループという異なる３つのグループが一堂に会して、授業実践に向けて直接的に意見を交換し合うことであると考える（補足資料２３）。

これまでの討論会では、第３グループに該当する先生方の参加が少なかったため教育現場に直結する意見交換が活発とは言えなかったが、今回は前述の望ましいかたちが実現できたのではないかと考える。実践報告、講演、及びパネル討論における意見交換を通して、授業実践のための手がかりや参考を見出していただければありがたい。そうした意見交換を支援するのがＮＰＯの役割であると思う。

②理科と社会科をいかにつなげるか、今田先生は、教科横断型のカリキュラムに向けて「メリット・デメリットを必ず捉えさせるべき」を最重要な提案に挙げている。メリットやデメリットの発想は社会科であるが、なぜそうなのかと掘り下げて考えることで理科的発想を促し、科学的な理解や考察が必要となる。まさに教科横断に直結する提案であると感服した。つまり、社会科だけでは深まらない。一方、理科だけは広まらないし、高まらない。地理、歴史、公民はそのためにある、と考えさせられた。専門家による支援内容にも結び付けられないだろうか？

③教科横断の必要性は理解できたとしても、理科と社会科の先生方がどんな授業を実践すべきか、あるいは協力すべきかを議論できる段階には至っていない。しかし、前向きなひとつの具体的な提案が出された。つまり、各学年の社会科授業のカリキュラムを理科の先生が知ることによって、理科と社会科のカリキュラムがつながる手掛りやヒントを探り当てようという提案である。一方、社会科の先生ならば、これと逆方向の探り当てを試みるということになる。理科と社会科だけでなく技術・家庭科についても試みる価値があろう。

④ 今回は「エネルギー・放射線教育」という捉え方で「放射線」を位置付けて実践報告でも取り上げた。ある参加者から「3. 11後、経年とともに"なぜ放射線を学ぶのか”の共通理解求められていると思う。改めて"何のために”放射線を学ぶの

でしょう？」との質問があった。この質問で思い起こされるのは、１０年前の中学校学習指導要領改訂で放射線が復活し、読売新聞一面横抜きの大見出し"放射線教育３０年の空白”によって、わが国は広島・長崎の原爆被災の惨禍にもかかわらず、義務教育で放射線を教えてこなかったという事実を、国民が知るに至ったことである。参加者が投げかけた疑問を克服するためにも、理科と社会科の教科横断型授業が必要であると考える。

２）事務局としての評価（補足資料２４、２５）

①今回の名古屋開催の成功は、名古屋地域の会員組織が培ってきたこれまでの自主活動に起因するところが大きい。首都圏を離れての名古屋開催が地域間の交流を促進し、当ＮＰＯの活性化にもつながったと考える。

②ブース展示については、名古屋世話人グループの熱心な取組みによって、霧箱、簡易測定器、いま注目されているクルックス管、エネルギー変換を理解するための圧力測定実験など合計９件となり、これまでになく大いに盛り上がった（補足資料７）。充実した展示内容にもかかわらず、参加者が展示ブースに立ち寄る時間を十分にとれなかったことが、今後への課題であると考える。ただし、会場横に十分な広さをもつフリースペースがとれたことが幸いした。

③パネル討論のための事前準備のために、実践報告者毎に色分けされた質問票を講演時間中に質問内容によって仕分けする作業を別室で行うことで、限られた時間内でパネル討論での意見交換を有効に進めることができた。ただし、仕分けには教育現場に精通している現役の先生の助けが必要であり、そのために仕分け担当者は講演を聴く機会を失うことなど、事前準備に避けがたい負担が課題である。

④開催費用については、開催及びその準備のため、事務所がある東京と開催地の名古屋間の交通費の負担が大きかったが、今回は実践報告者及び講演者が全国に分散せず、名古屋及び周辺の在住者であったため、草の根ＮＰＯ等活動の支出総額を支援限度額以下に抑えることができた。

７．事後広報

今回の公開パネル討論会については、すべての発表内容をホームページに掲載する。各実践報告の内容及び公開パネル討論会の振り返りを当フォーラムが定期的に発行しているニュースレターに紹介する。また、伊藤周広氏のエネルギー政策に関する講演内容を当フォーラムの機関誌「放射線教育」に紹介するとともに、今夏の日本エネルギー環境教育学会など、関連する学協会の年会等においても実施成果を発表する予定である。

## 補足資料一覧

補足資料１　田中、宮川：「新教科書による中学校での放射線授業実践の支援」,エネルギー環境教育研究 Vol.11,No.2,77-82(2016)
補足資料２　0704 名古屋での事前打ち合わせ議事メモ
補足資料３　0717 第１回企画運営委員会まとめ
補足資料４　0810パネル討論準備打合わせ議事メモ
補足資料５　公開パネル討論会案内
補足資料６　パネリストプロフィール
補足資料７　ブース展示の概説及び内容
補足資料８　1009公開パネル討論会準備会合議事メモ
補足資料９　実践報告及び講演資料
補足資料１０　参加者アンケートフォーム
補足資料１１　登壇者アンケート設問
補足資料１２　公開パネル討論会における実践報告概要
補足資料１３　公開パネル討論会における講演の実施内容
補足資料１４　パネル討論議事メモ
補足資料１５　公開パネル討論会写真集
補足資料１６　公開パネル討論会来場者データ
補足資料１７　公開パネル討論会参加者アンケート結果集約
補足資料１８　登壇者事後アンケート結果まとめ
補足資料１９　0108第２回企画運営委員会まとめ
補足資料２０　公開パネル討論会来場者の内訳
補足資料２１　登壇者を対象とした事後アンケートまとめ
補足資料２２　演者の評価に関する参加者アンケート結果グラフ
補足資料２３　授業実践の支援のあり方（図）
補足資料２４　公開パネル討論会の振り返り―事務局として
補足資料２５　公開パネル討論会の振り返り―名古屋側から

## ８．第 64 回全国中学校理科教育研究会北海道大会の概要

(放射線教育フォーラムニュースレターNO.69 に掲載)

NPO 法人放射線教育フォーラム　　宮川　俊晴

平成 29 年 8 月 2 日～4 日、札幌市教育文化会館及びホテルライフォールト札幌で開催された題記研究会の企業ブースへ出展参加した結果を報告する。

大会は、主題「自然と人間との調和をめざし、未来を創造する力を育む理科教育」、副主題「自ら学びを推し進め、科学的な資質・能力を育む理科学習を求めて」を掲げて実施された。当フォーラムは企業展示ブースに出展し、フォーラムの活動や先生方からの質問に答えた。

8 月 2 日初日は夜の部で、「若い理科教師の集い」が開催された。一会場の中で 12 名の先生が 4 人同時に 15 分間のポスター発表と実験の演示を行った。3 回実施された発表会はそれぞれの場所に、20 名程の先生が集まって、熱心にメモをとり、質疑を行っていた。放射線授業の実践報告が 1 件あり、長崎大学教育学部附属中学校の前田勝弘先生が「クルックス管を利用したレントゲンの再現実験」として、クルックス管の表面にデンタルフィルムを張り付け、クリップの透過試験を実演した。デンタルフィルムは、現像液を内蔵したものであり、照射後、即、その場で現像・感光が出来、スピーディな実験方法であった。

12 名の発表の後には、約 10 名ずつ 8 つのグループに分かれ、グループディスカッションが行われ、私も 1 つのグループに参加した。議論のテーマは、大会の主題・副主題から、「未来を創造する力を育む学習展開」と「これからの理科教育で育成すべき資質・能力とは」の 2 題からひとつ選び、教師として何をどうするのが適切かと、意見を出し合い、まとめて最後は発表が行われた。グループ内ではサイエンスリテラシーの向上、コミュニケーション力の育成など非常に活発な意見交換が行われ、さすが各県から選抜されて全国大会に参加する先生方の意識の高さを感じた。

8 月 3 日は、朝からブースの開設準備を実施し、昼前から来客対応を実施したが、大会会場では、午前中に文部科学省初等中等局教育課程教科調査官の藤枝秀樹氏の「これから求められる理科教育を考える－学習指導要領改訂を受けて－」の講演があり、昼食時間を利用して、4 校の中学生の実践報告があり、午後は、5 つの分科会（第一分科会：科学的な資質・能力を高め未来を創造する力を育む教育課程。第二分科会：自ら学びを推し進め、科学的な資質・能力を育む学習指導。第三分科会：科学的な資質・能力を育むことに機能する観察・実験。第四分科会：自然を総合的に捉え、自然と人間との調和をめざす環境教育。第五分科会：自ら学びを推し進め、未来を創造する力を育む学習評価）に分かれ、各会場で全国から参加した 5 名の先生方が実践報告をし、会場との質疑の後、助言者から評価・講評が述べられた。

8 月 4 日は、午前中、ヒグマ学習センター主宰・室蘭工業大学非常勤講師の前田菜穂子氏の「ヒグマを育て自然を学ぶ」の講演が実施され、昼に閉会式が行われ、大会宣言を採択し閉会した。

3, 4 日とブース展示の合間を見て、一部の発表を聴講することが出来た。それぞれの発表では、実験や教材に様々な工夫が凝らされ、先生方の努力と熱意が伝わって来た。

展示ブースでは、8 月 3 日、4 日と来場者への NPO 法人放射線教育フォーラムの活動紹介を実施した。会場には他に教科書会社や教材会社が多数参加し、いろいろな教材材料を配布していた。我々のブースではニューズレター No. 61～66 まで放射線教育のパネル討論の活動がある内容を各 150 部用意し、来場者に約半数を配布した。また、大阪府立大学の秋吉先生考案のペリチェ式霧箱を展示し、放射線の飛跡の観察をして頂いたところ、多くの先生方の関心を集めた。この霧箱は 4, 5 時間連続して飛跡が観察でき、手間の掛からない便利な展示物であった。ブースは事前に大会事務局に要望した通りに、右隣に千代田テクノル、左隣に原産協会と三者並んでの配置であり、千代田テクノルの簡易測定器やガンマカメラ、原産協会のパンフレットなどお互いの出展物を活用し説明を補うことが出来、先生方に関心を持って頂き、効率的な紹介が出来た。今後ともブース展示への参加は資料の配布だけではなく、霧箱など演示する実験機材や他の機関と協力して運営できる配置が有効と感じた。また、機材貸し出しや、出前授業の相談があり、「らでぃ」の出展ブースを紹介した入り、フォーラムのパネル討論に参加頂いた東京書籍の担当者が来店され交流が深まった。

更に大会終了後に、展示参加していた教材会社の島津理科のブースで、前田先生がクルックス管を借り、デンタルフィルムを使った即席実験を行った。また、千代田テクノルの測定器でクルックス管近傍の線量測定も実施した。その結果、使用したクルックス管と電源装置では、デンタルフィルムが感光しないことが確認され、線量率もバラつき、系統的に説明できるデータとはならなかった。4 年後の新教科書では 2 年生で採用されるクルックス管からの放射線の授業においては、実験条件を十分吟味する必要があることが示唆された。

次回第 65 回大会は、兵庫大会で、期日、平成 30 年 8 月 8 日（水）～10 日（金）、場所、ANA クラウンプラザホテル神戸・神戸芸術センター会場での開催がアナウンスされた。

最後に、今回、日本原燃の長谷川浩氏に現地の応援を頂き、交替でブース紹介が出来たことにより、先生方の発表を聴講することが出来、とても有益であった。この場をお借りし、長谷川氏にお礼を申し上げたい。可能ならば今後も 2 名での参加が望ましいと考える。

# 放射線教育フォーラム
# 2017 年度活動に関わる参考資料


頁

１．新教科書による中学校での放射線授業実践の支援（田中隆一、宮川俊晴）　1
　　― 放射線教育フォーラムの最近の活動から ―
　　日本エネルギー環境教育学会発行の「エネルギー環境教育研究」Vol.11,NO.2 から転載

２．理科と社会科からアプローチする主権者教育（大津浩一）　7

３．日本のエネルギーの課題と展望（伊藤周広）　11

４．公開討論会「エネルギー・放射線教育 in 愛知」スナップ写真集　16

資　料

（出展：　エネルギー・環境教育研究 Vol. 11 NO. 2 p77-82）

# 新教科書による中学校での放射線授業実践の支援
## ー放射線教育フォーラムの最近の活動からー

# Support for Practice Teaching of Radiation Using New Science Textbooks in Junior High School:
## Recent Activity of NPO Radiation Education Forum

田中隆一，宮川俊晴
NPO 法人放射線教育フォーラム
TANAKA Ryuichi, MIYAKAWA Toshiharu
NPO Radiation Education Forum

**要約：** NPO 法人放射線教育フォーラムは，主に中学校理科における放射線授業の実践を支援するため，これまで４年間，一連のパネル討論会の場で教員と専門家や支援者の間で直接的な意見交換を進めてきた．ここでは４年間にわたる支援活動の概要を紹介する．また，2016 年度の中学校理科教科書の改訂の機会に，新教科書の放射線の記述に基づいてパネル討論の成果として，中学校３年間で段階的に積み上げる放射線授業プランを提案した．その内容についても述べる．

## 1. はじめに

放射線教育フォーラムはボランティア型の NPO 法人であり，放射線の正しい知識の普及を目指して活動している．教育の主な対象は将来わが国を担う子どもたちであるが，フォーラム会員の多数を占める専門家が直接に支援する主な対象は子どもたちと接している学校教員である．したがって，教員の方々がどんな授業を行っているか，つまり，教育の現場をよく知ることが効果的な支援に結び付く．教育現場に身を置いていないわれわれ専門家及び支援者は，放射線の授業実践について学校教員と意見交換を重ねることを通して，支援を有効に進めることが求められている．

当フォーラムは東電福島第一原子力発電所事故の後，支援活動が一時期停滞したが，2013 年度から主に中学校理科の教員を対象に，公開パネル討論などの機会を通して，放射線授業の実践に焦点を合わせた意見交換の活動を進めてきた（田中 2014, 2016）．ここでは，支援活動の概要について紹介する．また，中学校教科書改訂の機会に，授業実践のよりどころとなる新教科書の放射線記述に基づいた支援として，それまでのパネル討論での意見交換の成果を採り入れて，放射線の理解を中学校３年間で段階的に積み上げる授業プランを提案したことについても述べる（宮川 2016）．

## 2. 中学校理科の放射線授業実践の一般的な背景

中学校理科の 2008 年度学習指導要領改訂で「放射線に触れること」が記載されるまで，放射線教育の空白が約 30 年間続いた（田中 2009）．このため，高校，大学で物理を選択せず，放射線を学んだ経験及び教えた経験のない理科教員が多数を占めているのが実態である．加えて，福島での原子力災害を踏まえて 2016 年度から使用され始めた中学校理科教科書の放射線記述については，内容の新しさ及び豊富さゆえに，教員による自己研鑽が難しいと考えられる．しかし，従来から行われている専門家による一方向的な放射線に関する情報提供は，実態として限られた授業時間数で生徒の理解を深める授業を実践するには，効果的な支援として役立っていない．教員の授業実践へのためらいやとまどいにはこうした背景があると考える（図１）．福島での事故による環境への放射性物質の大量放出に起因する社会混乱を背景に，保護者や一般市民の不安や疑問，放射線に関する巷のうわさなども心理的に影響している．

## 3. 放射線授業支援の方法について

以上述べた背景のもとで，放射線の授業実践に向けて外部からどのような考え方で支援したらよいか？

われわれは，このような難しい学習環境のなかで，熱心に放射線授業を実践している数少ない先駆的な授業実践事例に着目した．授業実践の経験を共有し広く普及させるために，われわれ専門家が意欲的に実践している

教員と意見交流を行うことが，授業実践を全国的に広げていく端緒となると考えた．

一方，自らの考えで放射線授業を実践したいと思っている多数の教員が，先導的な実践事例から自らの授業実践への糸口やきっかけを見出すことが期待される．また，実践している教員やこれから実践したいと考えている教員から専門家や支援ボランティアが学べる事柄も少なくない．まず，先駆的な実践事例をもとにした意見交換を通して，授業実践者と専門家及び支援ボランティアの協力関係を築いていく．そのうえで，放射線授業の実践を試みたいと考えている多くの先生方とも支援の輪がつながるようにネットワークを築いていくことが目標である(図2)．

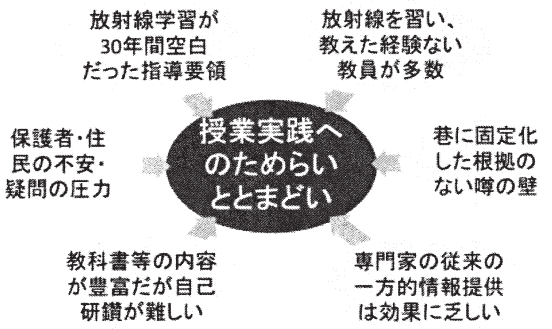



図1 教育現場での放射線授業実践の一般的な背景

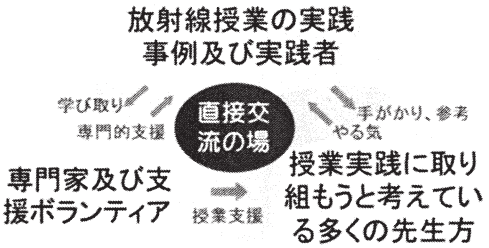



図2 放射線授業実践の支援ネットワークの考え方

それでは，具体的にどんな方法で意見交流の事業を進めたらよいか？　われわれNPOは，資金力，組織力，マンパワーなどにおいて，多くの公的な機関や団体に比べて劣るが，自発性，柔軟性，先駆性，専門性など，NPOに期待されている利点を活かそうと考えている．最も手軽な方法はインターネットの利用であり，当フォーラムもホームページ上に「先生の広場」のコーナーを設置して授業実践事例を紹介しているが，間接的な意見交流だけでは進展が遅い．そこで，顔の見える関係のなかで直接的な意見交流が促進できて，かつ，比較的低いコストで実施可能な形態として，授業実践の事例報告とパネル討論をワンセットにした催しを進める活動を企画した．

## 4. パネル討論会活動の企画

パネル討論会は，全国各地域からの数件の授業実践報告をもとに，パネリストとして実践報告者にファシリテータを加えたパネル討論を実施することを基本構成とした．2011年の東電福島第一原子力発電所事故を踏まえて，その折々に関心の高いテーマで，教材情報を提供するとともに，専門家の支援のあり方や現場教員のニーズを掘り起こす方向で，これまで8回のパネル討論会を通して，放射線授業実践の普及に向けて意見交換を行ってきた．

当フォーラムがこれまで4年間にわたって毎年企画してきたパネル討論会には二つのシリーズがある．

一つは，当フォーラム主催の「今やる，放射線教育」のシリーズであり，教材として有用なテーマを専門家に基調講演をいただいたうえで，いくつかの実践報告をもとに授業のあり方を討論した．また，放射線教育に欠かせない測定器などの教材情報を提供するため，ブース展示も適宜実施した．公開パネル討論シリーズのこれまでの開催結果の概要を表1に示す．福島での事故発生から2年半後の2013年11月に第1回を開催し，それ以後も毎年11月に開催してきた．会場は，東京慈恵会医科大学アイソトープ実験研究施設の協力を得て，同大学のホールを利用した．来場者数は80～120人であった．

もう一つのパネル討論シリーズは，多くの専門家が参加するアイソトープ・放射線研究発表会(日本アイソトープ協会主催、放射線教育フォーラム企画)におけるパネル討論である．

表1　公開パネル討論「今やる，放射線教育」シリーズの開催実績（主催：NPO法人放射線教育フォーラム）

| 時期 | 実践報告者の地域 | テーマ | 基調講演者 |
|---|---|---|---|
| 2013.11 第1回 | 福島　北海道　広島　長崎　神奈川 | 放射線の健康影響 | 宇野賀津子（ルイ・パストゥール医学研究センター） |
| 2014.11 第2回 | 福島　北海道　宮城　福井　鳥取 | 放射線の利用 | 小林泰彦（原子力機構） |
| 2015.11 第3回 | 福島　山形　東京　愛知　大阪 | 新教科書に基づく放射線授業づくり | 畠山正恒（聖光学院中学校・高等学校） |
| 2016.11 第4回 | 福島　栃木　東京　熊本 | 授業の評価規準について | 清原洋一（文部科学省），宮川俊晴（放射線教育フォーラム） |

ここでは，日常生活に密着した放射線問題を扱っている福島県内の実践事例を全国に発信し，共有することを目的として，「北から南から福島を踏まえた放射線教育の全国展開」とし，多くの専門家の方からの多様な支援の具体化を狙いとした．パネル討論「北から南から…」シリーズの開催結果を表2に示す．事故発生から2年後の2013年7月の第1回開催以来，毎年7月に東京大学弥生講堂で開催されて，来場者数は70〜130人であった．なお，授業実践の支援活動については，上記のパネル討論の催しに加えて，当フォーラムが毎年2回開催している放射線教育フォーラム勉強会でも毎回取り上げてきた．また，当フォーラムの放射線教育ニュースレター(毎年度3回発行)や定期刊行誌「放射線教育」でも取り上げてきた．

表2　パネル討論「北から南から福島を踏まえた放射線教育の全国展開」シリーズの開催実績

| 時期 | 実践報告者の地域 | テーマ | 基調講演者またはファシリテータ |
|---|---|---|---|
| 2013.7 第1回 | 福島(2件)　北海道　山梨　福岡(高校) | 放射線授業実践 | 高畠勇二（全国中学校理科教育研究会） |
| 2014.7 第2回 | 福島　茨城(小学校)　愛知　奈良 | 同上 | 清原洋一（文部科学省） |
| 2015.7 第3回 | 福島　東京　徳島　長崎 | 新教科書の放射線記述 | 畠山正恒（聖光学院中学校・高等学校） |
| 2016.7 第4回 | 福島　東京　大阪 | 新教科書による放射線授業 | 高畠勇二（エネルギー環境理科教育推進研究所） |

## 5. パネル討論活動の概要

公開パネル討論「今やる，放射線教育」シリーズの第1回(2013年11月)は，基調講演として免疫学の専門家であるルイ・パストゥール医学研究センターの宇野賀津子氏を迎えて，当時社会の関心の的であった放射線の健康影響に免疫力を高める食生活が重要な役割を担っていることが示された．実践報告では，生徒が自ら考えて主役となる放射線教育や放射線の健康影響に関する養護教員とのチームティーチングなどを進めている郡山市の実践事例(佐々木2014)や札幌市での小学校，中学校での体系化の取り組み(森山2014)，さらに，平和教育という扱いで真正面から放射線教育に取り組んでいる広島と長崎での実践事例などが報告された．パネル討論では，健康影響や教育現場の話題を中心に活発な意見交換がなされた(宮川ら2015)．

2014年度の第2回では，放射線の有用性と科学的な理解を深めることを目的に，日本原子力研究開発機構の小林泰彦氏が放射線の性質とそれを活かした利用事例

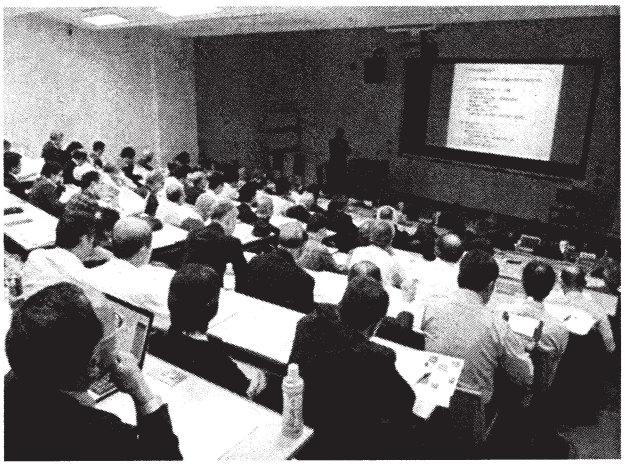


図3　公開パネル討論「今やる，放射線教育Ⅰ」における一場面（2013年11月10日　於東京慈恵会医科大学　来場者数116名）

に関する基調講演をもとに，授業への展開が議論された．また，中学校1年から3年までの様々な単元で放射線を扱う可能性や専門機関と連携した実験の有効性が紹介された(宮川ら2015)．

2015年度の第3回は，2016年度から使用されている新しい中学校理科教科書に充実した放射線記述が登場したことを受けて，「新教科書による授業づくりを考える」という具体的な目標付きのテーマを設定した．このため，教員有志等による委員会を設置し，新教科書の記述を踏まえ，これまでのパネル討論の結果を採り入れて，中学校の3年間を見通した放射線教育の授業プランを作成した．その結果，放射線の授業は現行カリキュラムに組まれている3年生の最終学期だけではなく，1年から3年までの3年間の理科授業期間のなかで実施できる授業プランを提案した(後述)．公開パネル討論では各学年での発展的な学習の扱いについて議論が掘り下げられ，原子力発電所に関連したエネルギー資源の扱いに留まらず，放射線を科学として幅広く扱う必要性が強調された．パネル討論の活動のまとめとして，当フォーラムは授業プランをホームページで公開している．

一方，毎年7月に実施しているパネル討論「北から南から…」シリーズでは，先生方が子どもたちや保護者と向き合って様々な苦心をされている教育現場の実態を，参加した幅広い分野の専門家や支援者が知る機会となった意義が大きいと考える．特に，福島の事故で教育現場がどう変わったのか，測定器や実験機材の確保がなぜ放射線教育の優先事項なのか，放射線教育はなぜ理科を超えた教科横断的あるいは総合的な扱いが重要なのか，多くの専門家や支援者に実感として理解されたと考える(宮川2013, 2014, 2015，佐野2014，渡部2016)．

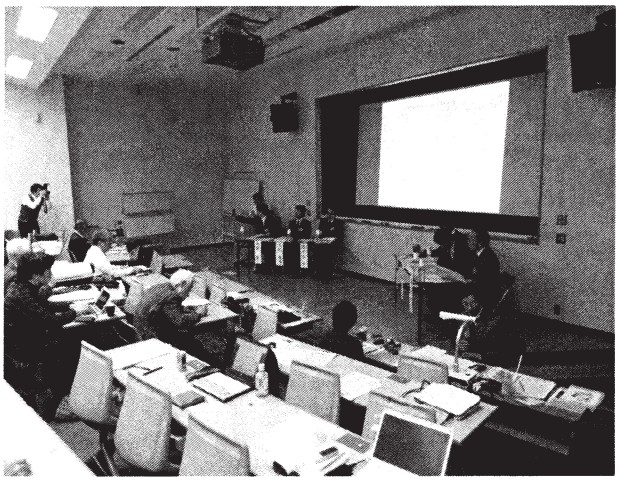


**図4　公開パネル討論「今やる，放射線教育Ⅲ」におけるパネル討論の場面（2015年11月23日　於東京慈恵会医科大学　来場者数 106名）**

両シリーズ合わせて，これまでの４年間で３０件以上の放射線授業の先導的な実践事例が紹介された．これらを通して，教員，専門家，支援者の間で意見交換を重ねながら，放射線授業の全国的な普及を目指して支援のネットワークを広げてきた．紹介された全ての授業実践事例は当フォーラムのホームページ「先生の広場」及び定期刊行誌「放射線教育」17～20巻の参考資料に掲載されている．

## 6. 新教科書の放射線記述について

2016年度から使用されている中学校理科教科書の記述は放射線授業支援のよりどころとして重要な位置づけにある．学習指導要領における30年ぶりの復活を経て，2012年度に登場し，今回改訂された教科書における放射線の記述について以下に述べる（田中ら2015）．

放射線教育の視点からこれまで明らかになった新教科書における放射線記述の主な特色は，

① 記述は発行者によって多少の違いが見られるが，自然放射線，放射線の種類，性質，利用，影響，防護，実験，単位，科学史等の基本事項が概して万遍なく網羅されることで学習内容が充実したこと，
② 福島の事故を踏まえた新しい記述が登場したこと，
③ 3学年の最終単元である「エネルギー資源」より前の1～2学年の複数単元において放射線にも触れる発展的な記述が登場したこと

である．特に，エネルギー資源の単元の学習に先立って，放射線に触れる学習が容易になった意義は大きいと考える．

その一方，記述内容が詳しくなった結果とも言えるが，誤解を招く可能性のある記述が，放射性物質，放射線の性質と利用，放射線の健康影響，放射線に関わる単位などの記述に散見される．放射線の健康影響を例にとれば，「放射線はＤＮＡを傷つける」ことの記述が多数の教科書に共通的に見られるが，人体を構成するＤＮＡが放射線以外の原因によって日常的に損傷を受けているという事実を子供たちが知らなければ，放射線のみがＤＮＡを傷つけるとの誤解を招くことになる．誤解を避けるためには，ＤＮＡ損傷を及ぼす放射線以外の要因と損傷修復について，中学生には難しい科学的事実を追加記述する必要に迫られる．しかし，教科書では記述が平易であることや限られたスペースに放射線に関する基本的な内容を多く盛り込むことが大切とされており，誤解を避けるための科学的な正確さや認識を深く追求することは，結果として字数が大幅にかさむことにもなるので，現実的には難しいのではないかと考える．ただし，ＤＮＡの損傷修復の科学的事実について教科書で触れる工夫が必要であると考える．放射線の単位や測定についても，教科書記述を含めて科学的に正確に理解させるのは中学生には難しい．この場合はむしろ誤解を覚悟のうえで，安全に配慮した実験・観察のなかで，放射線の扱いに慣れさせることが大切と考える．

当フォーラムの教育課程専門委員会（委員長 黒杭清治　ホームページ参照）では，2016年度から使用されている中学校理科教科書や2017年度から使用される高等学校低学年用の理科教科書における放射線記述について調査中である．上に述べた問題点を踏まえたうえで，誤解の影響が少なく，全体としてバランスのとれた教科書記述への改善に向けて，教科書出版会社との間で建設的な意見交換の場を設ける動きも進みつつある．

## 7. 中学校3年間を見通した授業プランについて

中学校理科の最終単元「エネルギー資源」のなかで初めて登場する放射線の授業は，高校受験を目前に3年間の総復習とも時期が重なるので，生徒の十分な理解を意図する授業が難しいとパネル討論のなかで繰り返し指摘された．また，放射線記述が充実した新教科書を有効に活用しようとすれば，先生方の負担が過重になるという見方もできる．

今回作成した3年間で段階的に実施できる授業プランはこれらの問題を軽減するだけでなく，放射線に関わる理解を中学校3年間で段階的に積み上げて深めていくことを意図している．これが容易になった背景は6．で述べたとおりである．また，各単元で指導されている内容に縛られずに放射線授業を独自に推進している福

島県の実例もある(福島県教育委員会 2015).

中学校３年間で放射線理解の段階的な高度化が期待できる学習内容の展開例を表３に示す. 放射線イメージの実感から始まって, 科学的概念の定量的な理解や社会的な意思決定に関わる判断力まで, 難度を高めていく授業内容の展開が期待される. このためには, 霧箱観察や簡易放射線測定器による放射線実験・観察を取り入れた体験的学習をどのように取り入れていくかが重要な鍵であると考える(宮川 2016).

**表３　中学校３年間で段階的な発展が期待できる放射線学習内容の展開例（授業プラン）**

| 年 | 単元 | 学習内容 |
|---|---|---|
| 1 | 光と音 | 見えない光で電磁波の発展的な理解へ. 波長の短いX線, ガンマ線の存在, 放射線イメージの実感 |
| 1 | 火山と地震 | 火成岩を通して自然界の放射線の存在を理解 |
| 2 | 電流 | クルックス管実験でX線発生の発展的な理解. 放射線の性質に触れる. 放射線発見の科学史の理解 |
| 2 | 動物の体のつくりと働き | 放射線による健康影響の基礎的な理解 |
| 2 | 化学変化 | 原子・分子の基本学習を通してミクロな粒子の理解 |
| 3 | 科学技術と人間 | 放射線の定量的な理解. 放射線利用や健康影響について考える. エネルギー資源に関わる意思決定 |

## 8. 今後に向けて

「放射線」が抱えている豊富な学習内容の一つ一つには, 理科における他のいくつかの単元の多くの学習要素に直結する多様性がある. 授業プランはその多様性を積極的に活用して, 好奇心を持って, 段階的, 効果的に生徒の放射線理解を３年間で高める工夫である. 様々な工夫によって放射線授業を実践できるように, 自然現象への関心, 科学的な思考・判断, 実験・観察の技能など授業の内容及び評価規準について議論を深めていきたい. 今後, 多くの実践事例を集約・整理し, 授業の継続的な改善によって授業プランを充実させ, 授業に取り組む先生方と共有したいと考える. また, この授業プランについて多くの先生方からご意見やご批判をいただき, 単元の中の授業コマ数や１コマの内容についても, 改善を支援していきたいと考えている.

放射線授業の支援については, これまで述べてきた中学校の支援活動を手掛かりとして, 高等学校あるいは小学校へ広げる方向を模索している.

2017 年度から使用される高校低学年用の理科教科書では,「物理基礎」「化学基礎」「科学と人間生活」の３科目について放射線が記載されている. それらの内容は発行者によってかなり異なるが, その基本は中学校と同様な公民的資質の涵養を主目的としており, 中学校教科書における放射線記述を受け継いでいるか, あるいはオーバーラップしている. このためかもしれないが, 全体的に中学校の学習内容からの発展が見えにくい. 高校低学年での放射線授業実践の現状把握をもとにして, 中学校と高等学校の間での放射線学習の共有と分担が課題ではないかと考える.


## 謝辞

難しい実践環境下での先駆的な放射線授業の実践報告をパネル討論会のために快く引き受けていただいた熱意溢れる多くの先生方に深謝するとともに, ご多忙のなか, 放射線教育の全国展開に向けたパネル討論に熱い思いで参加していただいた方々に心から感謝する.


## 参考文献


福島県教育委員会(2016), 放射線等に関する指導資料［第５版］

宮川俊晴(2013),「第 50 回アイソトープ放射線研究発表会から」パネル討論３,Isotope News No. 715, pp43-45

宮川俊晴(2014),「第 51 回アイソトープ放射線研究発表会から」パネル討論３,Isotope News No. 727, pp48-49

宮川俊晴(2015),「第 52 回アイソトープ放射線研究発表会から」パネル討論３,Isotope News No. 739, pp52-53

宮川俊晴, 田中隆一(2015),「放射線教育支援活動の取り組み」日本エネルギー環境教育学会 第 10 回全国大会論文集, pp104-105

宮川俊晴(2016),「放射線教育の公開パネル討論 ― ４年間の実績と中学校３年間の授業プランについて―」, 放射線教育, VOL. 20, NO. 1(印刷中)

森山正樹(2014),「中学校理科における“放射線”の実践紹介」, Isotope News No. 718, pp37-41

佐野嘉昭(2015),「名古屋市の中学校における放射線教育」, Isotope News No. 730, pp22-24

佐々木清(2014),「郡山市の中学校における放射線教育」, Isotope News No. 718, pp28-32

田中隆一(2009),「学習指導要領に基づいた放射線等の取り扱いに関する考察」, エネルギー環境教育研究, VOL. 3, NO. 2, pp. 73-79

田中隆一(2014),「放射線教育の現状と在り方について」, 放射線教育, VOL. 18, NO. 1, pp. 53-57

田中隆一(2015),「新しい中学校理科検定済教科書における放射線記載の傾向」日本エネルギー環境教育学会 第 10 回全国大会論文集, pp114-115

田中隆一, 宮川俊晴(2016),「新教科書による中学校で

の放射線授業実践の支援」, 日本エネルギー環境教育学会第11回全国大会論文集, pp101-102
渡部智博(2016), 「第 53 回アイソトープ放射線研究発表会から」パネル討論3,Isotope News No.748, p32-34

## ２．社会科と理科からアプローチする主権者教育*

3 年生文理コース　学校設定科目「時事問題」生徒 97 名が受講

大津　浩一

18 歳から選挙権を持つようになった今、高校での主権者教育は喫緊の課題です。社会における選択において、社会を広く知ることは重要ですが、科学的知識なしに判断できないものはたくさんあります。遺伝子組み換え作物、出生前診断、個人の遺伝情報を利用しての治療の是非など、その判断が私たちの社会に影響を与えるだけでなく、将来世代まで影響を及ぼすものも少なくありません。今回、その一つの例として、原子力発電を取り上げ、以下の日程に示すように、外部講師の講義 3 回を含む一連の授業を行いました。

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 9 月 12 日 | 火 | 3 クラス合同 | 理科教諭 | 時事問題の理解・判断と科学（理科）の関係 | 地球温暖化と予防原則を題材に |
| 9 月 19 日 | 火 | 3 クラス合同 | 名古屋大学<br>石坂丞二先生 | 地球温暖化とその影響 | 地球温暖化とその影響 |
| 9 月 26 日 | 火 | 3 クラス合同 | 理科教諭 | 事前講義<br>原子力を活用すべきか | 両講師からの資料を提示し、論点整理 |
| 9 月 28 日 | 木 | 3 クラス合同 | 高木学校<br>崎山比早子氏 | 講義<br>原子力を使うべきでない | |
| 10 月 10 日 | 火 | 3 クラス合同 | 常葉大学<br>山本隆三氏 | 講義<br>原子力も活用すべきだ | |
| 10 月 12 日 | 木 | 3 クラス合同 | クラス担当と理科教諭 | 原子力の活用をどうするか | グループごとにまとめ　模造紙で |
| 10 月 17 日 | 火 | 各クラス | クラス担当 | 発表 | 全グループが発表 |

課題「原子力を活用すべきか」

生徒に提示した今回の授業の意図は、以下の通りです。

1．原子力発電の利用に対して賛成・反対の双方の考え方の比較をしながら自らの考えを深める

2．仲間と意見を交換しながらさらに考えを深めてまとめる

3．まとめた意見を表現する

その方策として、課題に取り組む前に理解させたいこと（情報リテラシーと科学リテラシー）は以下の通りです。

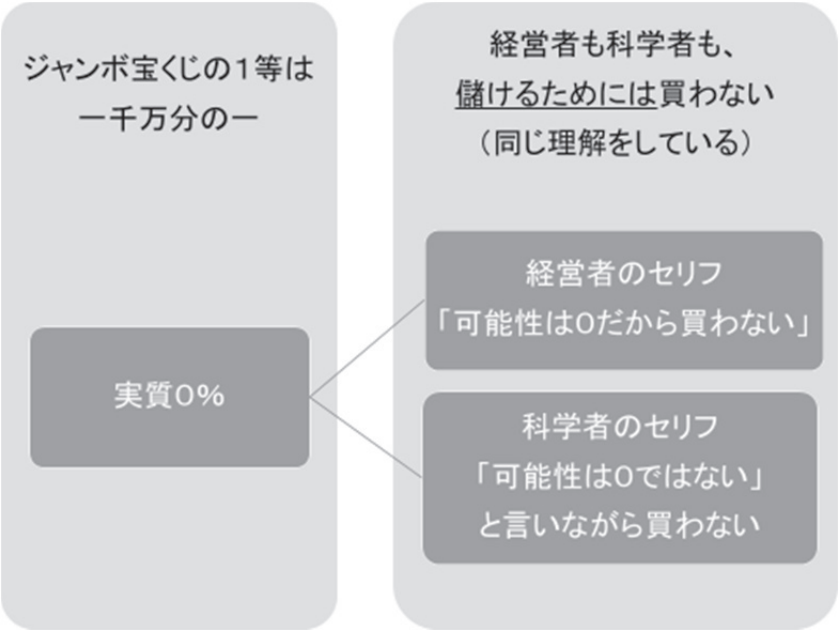
---

＊この資料は、著者が勤務する名古屋経済大学市邨高等学校が中学校へ配布した学校紹介文です。平成 29 年 11 月 23 日に名古屋大学東山キャンパスで開催された公開パネル討論会における参考資料として配布されました。

①判断のために、判断の目的をはっきりさせる
②サイエンスリテラシーをもとに状況を理解する
③同じ認識でも、科学者は違う表現をする
④ひとつの例を持って全体を判断するのは危険
⑤両論併記の場合でも、双方の支持者数に圧倒的な差があることは多い。

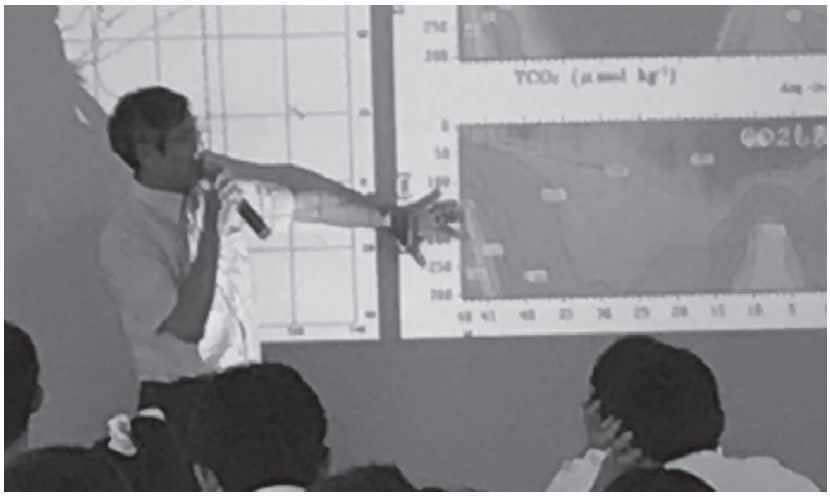
これらを学習するために、「時事問題の理解・判断と科学（理科）の関係」という講義を本校の理科教諭が行いました。

①②の例として、道路に落ちているヒナをどうするかという質問をしました。もしかしたら巣から落ちたのかもしれないが、巣立ちで飛行練習をしているかもしれない。また、落ちたとしてもどう救うのか。ヒナを救うのか、生態系を救うのか。巣から落ちた生き物で支えられている生き物もいる。科学リテラシーを持っていると、より適切な判断ができる可能性が高くなります。




③の例として、スライドを見てください。同じ事実に、言葉の使い方が違うのです。

同じ時間内に、温暖化のリテラシーの講義も行い、次の時間の名古屋大学宇宙地球環境研究所の石坂丞二教授の講義「地球温暖化とその影響」の準備としました。



名古屋大学　石坂丞二先生

石坂先生は、船に乗っての現地調査と衛星観測のデータを使っての分析を紹介してくださいました。一連の授業の後にアンケートによると、生徒の温暖化への信頼度は大きく変わりました。

次の授業では、再度本校の理科教員による授業を

行いました。原子力活用に対する賛否を論じていただくお二人の講師に論点を事前に示していただき、それを理解するために必要な科学的な解説を行いました。また、講義を聞く際に論点を理解・整理するためのプリントを配付し、最後の発表までのスケジュールを示しました。

9 月 28 日に、高木学校の崎山比早子先生に講義をしていただきました。先生は、放射線・

崎山比早子先生

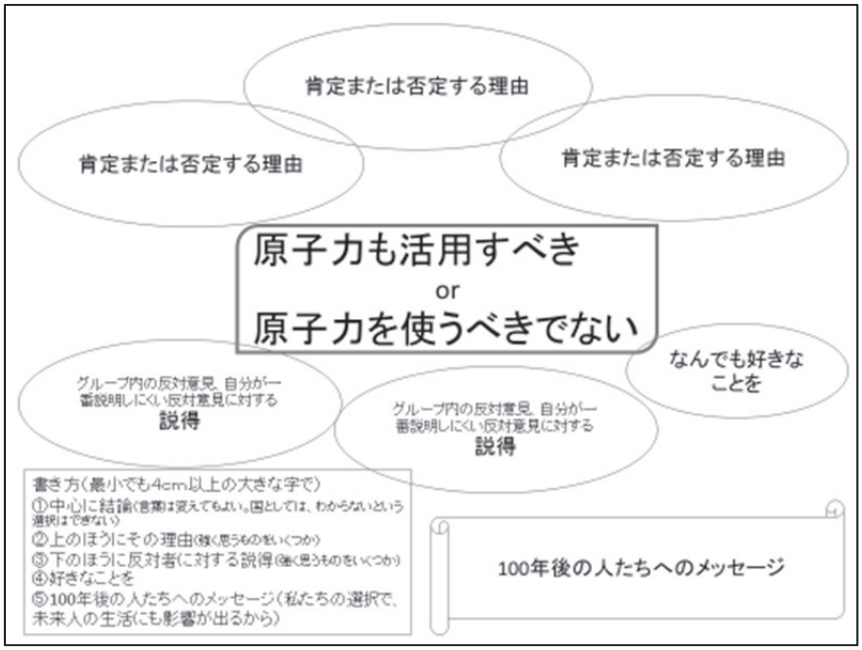
山本隆三先生

原子力関係の事故があると、中日新聞が一番にインタビューする方です。福島事故に関する国会の事故調査委員会の委員もされていました。

10 月 10 日には、山本隆三先生に講義をしていただきました。先生は、住友商事の地球環境部長などを経て、現在、常葉大学の教授です。国際環境経済研究所所長でもあり、テレビなどのメディアで原子力について語ることの多い方です。

お二人の意見は、インターネットでも公開されているので、ここでは触れません。

次の授業で、グループごとに模造紙に意見をまとめる作業を行いました。ひな形を示し、グループ内の反対意見も示すことや、自分たちの選択で将来世代の生活が変わることから、100 年後の人たちへのメッセージも示してもらいました。



グループごとの活動風景

発表の様子

生徒たちは、それぞれがそれぞれの講義に対して違う受け止め方をしました。アンケートで、原子力反対から賛成を１点から５点として、講義前後の考えを聞き、その変化を見たところ、表のようになりました。講義前には「考えたことがない」生徒も講義後は考えを持ったので、６８％の生徒が、考えが変化したことになります。新しい知見と、仲間との議論で、考えが変わらない場合もあるのだから、少なくとも約７割の生徒はしっかり考えたと判断できます。

| 変化量 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 人数（%） | 3 | 3 | 9 | 15 | 39 | 18 | 11 | 3 | 1 |

一方、話し合いの有効性を１点（無くてもよかった）から５点（とても有効）で意見を聞いたところ、次のようになりました。社会にとって重要な「他人と話し合って合意形成を行う」という価値観を身に付けさせるという課題が見えてきました。

| 話し合いの有効性 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 人数（%） | 10 | 4 | 35 | 19 | 22 |

市邨高校は、これからも教科を越えた教育に力を注ぎます。

## ３．日本のエネルギーの課題と展望　― 次世代へ向けてのメッセージ ―

中部経済産業局資源エネルギー環境課長
伊藤周広

ご紹介を頂きました中部経済産業局の伊藤です。

入省 30 年、いろんな仕事をしてきたが、半年前までは中小企業課長をしていた。過去にはガス事業課長として、トヨタの MIRAI の開発などとも関わりながら水素ステーションの設置促進を担当。エネルギー対策課長の時は、省エネや新エネの推進等もしていた。

本日のお話は「エネルギー」ということですが、先ほど来からの先生方のお話などを聞いて、配布資料から多少変更してお話しすることをご了解願いたい。

### １．1 次エネルギーの変遷：固体（石炭）⇒液体（石油）⇒気体？？

20 世紀は、石油の時代だったといわれている。産業革命から 150 年くらい、18 世紀の半ばから 19 世紀末までは蒸気機関、石炭の時代が続いた。19 世紀の終わりころ、次は何の時代になるか予想が分かれた。当時、トーマス・エジソンは、自社のエジソン電燈の社員ヘンリー・フォードと共に、次の 100 年間は何の時代になるか議論した。エジソンは電気の時代、フォードは、内燃機関、油の時代を主張した。当時、油が主流になるという意見は必ずしも有力ではなかった。燃料油は主にクジラから取っており、それでは量的に賄えないと考えられたからだが、テキサスから油が出て、フォードの予想が当たった。

次の 21 世紀は何の時代か。たぶん二次エネルギーとして電気を使うことについては、異論が少ないと思う。一次エネルギー源としては、何を使うかというと、今まで固体から液体に変わってきた経緯から、次は気体ではないかと言う人もいるが、分からない。

今、気体というと、天然ガス、ＬＰガス、水素などを思い浮かべる人が多いと思う。

### ２．天然ガス・ＬＰＧについて

ガス燃料について少し解説したい。天然ガスは、産地によって、カロリーが異なる。主成分はメタンだが、エタン、プロパンなどの成分比率が異なる。東邦ガスの場合、45 MJ/m$^3$になるように、ブレンドして都市ガスとして供給している。メタンは $CH_4$ で、これに C が

---

＊本稿は、平成 29 年 11 月 23 日、名古屋大学東山キャンパスで開催された公開パネル討論「エネルギー・放射線教育 in 愛知　― 理科と社会科の授業づくりを考える ―」において伊藤周広氏が講演された内容を、講師の了解をいただいて要約し、一部加筆・修正したものです。　（記録担当：NPO 法人放射線教育フォーラム　宮川　俊晴）

１つ増える毎にＨが２つ増えていく。ＨとＣの割合を見ると、メタンはＨの比率が多く、エタン（$C_2H_6$）、プロパン（$C_3H_8$）、ブタン（$C_4H_{10}$）、･･･オクタン（$C_8H_{18}$）と進むにつれて相対的にＣの比率が増える。結果として、燃焼時に$CO_2$がたくさん出ることになる。Ｃが少ないほど、環境にやさしいということになるが、Ｃが多いほどカロリーは高くなる。Ｃのかたまりである石炭はカロリーが高く、運びやすい。一方、メタンなど常温で気体のものは、運びにくい。ブタンはマイナス 0.5℃で簡単に液化する。２気圧程度で圧縮しても液化するので、ポケットに入れて持ち運びが容易なライターに使用されている。プロパンはマイナス 42℃で液化し、8.5 気圧程度でも液化するので、プロパンボンベに入れて、簡単に使用できる。都市ガス（主にメタン）はマイナス 162℃まで冷却しないと液化しない。

都市ガスのビジネスモデルは、液化するまで冷やして船で運び、大きなタンクに保管し、パイプを都市中に配管して、各家庭等に配る大がかりなもの。イニシャルコストがかかるが、管で送れる分だけ相対的にランニングコストが楽になる。プロパンガスは、容易に液化でき、ボンベに詰めて運べばいいので（都市内配管敷設が必要なく）、イニシャルコストが少ないが、各家庭への配達で、ランニングコストがかかる。工場や人口の多い地域は都市ガスモデルでやっているが、ガスの物性に応じて、ビジネスモデルが分かれている。ちなみに原子力はイニシャルコストがすごくかかるが、少しの燃料で、長く発電できるので、ランニングコストが軽いタイプにイメージされよう。

３．日本のエネルギー選択の歴史

エネルギーの**第一の選択**は、国内産の石炭を石油に置き換えたこと。60 年代以降、石油の利用が拡大し、エネルギーの国内需給率 58％が、大阪万博の 1970 年のころには 15%まで減った。

**第二の選択**はオイルショックで起こっている。省エネや原子力を取り入れたが、電気代は 10 年で２倍以上となった。**第三の選択**は、自由化と温暖化への対応。京都議定書により、二酸化炭素の削減が大きな課題となった。振り返ってみれば 1970 年の大阪万博のころは、日本原電の敦賀原発が稼働し、夏には関西電力も原発を稼働させている。このころは、鉄腕アトムも流行りで、未来のエネルギーというイメージがあり、21 世紀は原子力の時代と言う人もいた。

ところが、東日本大震災と福島第一の事故の後、**第四の選択**が求められた。再生可能エネルギーという選択肢の登場である。さらには、2050 年に向けて、**第五の選択**が求められている。パリ協定で高い目標が掲げられ、かなりドラスティックなことをしないといけない。第四の選択については、総合エネルギー調査会を立ち上げ、８月上旬から議論をしている。2030 年に向けた実現性の高い対応である。第五の選択については、８月末に情勢懇談会を作り、2050 年を念頭に議論されている。あらゆる可能性を議論するということで、宇宙飛行士とか幅広い人材に集まって頂いている。ホットな話題であるので、詳しくは、資源エネルギー庁のホームページを見てほしい。

一次エネルギーの変遷は、石炭、水力から石油に置き換わった。その後、天然ガス、原子力が出てきた。福島第一の事故の後、原子力が消え、代わりに再生可能エネルギーが増えている。石油については、第一次オイルショックの 76%をピークに減ってきたが、自動車のガソリンなど他のものに変えにくいものもまだ多い。一方、電気のエネルギー源については、石炭、水力から一気に石油に代わり、その後、原子力へとドラスティックに変化している。皆さんの叡智を借りながら不断の努力によって、変わってきていることはご理解いただけると思います。

４．日本のエネルギーの現状

（問１；日本は、国内の資源でどのくらいエネルギーを自給できていますか？）

エネルギー自給率は、2014 年で 6%。震災前は、原子力があり２割くらいあった。再生可能エネルギーが増え、原子力が動き始めたことから、2016 年には 8%まで戻してきている。グラフの主要先進国の中では、愛知県の半分の面積のルクセンブルグを除き、非常に低い水準にある。

（問２；日本はどのような資源に依存していますか？）

燃料については、第一次オイルショックのころ、海外から輸入する化石燃料が、電源の 76%を占めていた。2010 年の震災前には 62%まで減らしていたが、震災後、88%まで増えた。

（問３；日本はどのような国から資源を輸入していますか？）

原油は、狭いホルムズ海峡を通り、タンカーがアリのように列をなして通ってくる。石炭は、二酸化炭素をたくさん出すので否定的な意見もあるが、中東に依存せず、オーストラリア等からの輸入で安定供給が期待される。天然ガスは、中東からも入ってくるが、いろいろな国から幅広く輸入し、偏らない形になっている。エネルギー安全保障上、中東・北アフリカ情勢はとても注視されている。

（問４；電力コストはどのように変化していますか？）

電気代のグラフの変動は、燃料代の変動もあるが、浜岡が停止する前と比べて上がっている主因は、太陽光発電などの再生可能エネルギーの賦課金であり、平均的な家庭で毎月 700 円弱を払ってもらっている。国際的に見ても日本は高い。再生可能エネルギーで頑張っていると有名なドイツは、家庭用電気料金が日本よりかなり高い。（問 5、問 6 は飛ばします。）

（問７；今後、水素エネルギーは普及しますか？）

水素は製造方法もたくさんあり、使用時に $CO_2$ を排出しない究極のエネルギーとして、その普及を促進しているところ。中部地域では地元企業による FCV の量産化は産業政策的にも期待が大きい。（問８は飛ばします。）

（問９；日本の省エネの取組はどこまで進んでいますか？）

伊勢志摩サミットの際に三重大学が開いた国際シンポジウムでも説明させて頂いたが、日本のエネルギー消費量は、1973 年のオイルショックの時から現在まで 2 割くらいしか増

えていない一方で、GDP は 2.6 倍に増えている。日本の経済成長は周知のことながら、エネルギー消費の増大をさほど伴わずに成長を達成したことは、海外の研究者たちも想像以上であったようだ。特に製造業はエネルギー消費が減っている。それでも GDP は増えている。家庭は、1.9 倍に増えている。家電が増えて暮らしが便利になる中、核家族化、高齢化もあって、省エネが追いつかない。３年前に作成したエネルギー需給見通しでは、2013 年のエネルギー使用量は、原油換算で 3.6 億ｋℓであり、毎年 1.7%の経済成長を続けると仮定すると 2030 年には 3.8 億ｋℓほどが必要になる。これでは、諸外国との約束を果たせないので、5,030 万ｋℓくらい減らす方向としている。この削減量は、日本の全家庭が 1 年間に使用するエネルギーに相当する。それくらいの省エネが必要ということ。これを実践するには、「エネルギー消費効率の改善」のグラフでみると、オイルショックから 20 年間かけて省エネしたのと同じ結果を 2030 年までに出さなければならない。バブルの後の 20 年間もかなり省エネ努力をしてきたはずだが、その実績では足りない。

（問 10；なぜ、再生可能エネルギー（再エネ）の導入を進める必要があるのですか？）

（問 11．問 12 は飛ばします。）

（問 13；再エネだけでエネルギーを賄うことはできないのですか？）

再生可能エネルギーは $CO_2$ の排出抑制やエネルギー自給率の向上に貢献するので推進しているが、主電源にしようと思うと課題も多い。日本のように、国土が狭く傾斜地も多いと設置コストは高くなるし、広い原野には電線が無いなどネットワークの問題もある。自然エネルギーには調整火力も必要。太陽が陰ると、火力等で調整することになる。再生可能エネルギーのコストについては、将来的に家庭用では 25 円、産業用で 15 円位にしたいが、火力の代わりに畜電池で対応すると現在の技術のままでは 130 円の調整費が追加となってしまう。ドイツでは、再生可能エネルギーを増やす中で、石炭火力の比率も増え、$CO_2$ の排出量も増えてしまっている。

## ５．まとめ

経済産業局でもエネルギーの出前授業をやっています。また、授業で使う資料が欲しい方は、資源エネルギー庁ホームページで「エネルギー教育」を検索してみてください。

最後に、オイルショック当時に OPEC で活躍したサウジアラビアのヤマニ元石油相のコメントを引用したい。「石油の時代が終わるのは、石油が枯渇するからではない。時代は技術で変わる。石器時代が終わったのも、石がなくなったからではなく、石器に変わる技術が生まれたから終わったのだ。」

経産省はそうした技術分野でのソリューションを促進していきたいと活動しているが、時代を切り拓く「次代の人」を育てるのは、皆さんです。問題意識を共有し、次の時代に向けた高い目標を抱かせてあげてください。

## ６．会場との質疑

座長：非常に核心をついて重要なお話をして頂きました。私的には 1～3 時間ほどお聞きしたいのですが、残念です。お一人だけご質問をお願いします。

会場質問：(NPO 法人放射線教育フォーラムの○○です。)：中国では、EV に注力するとある。原子力をやり、自然エネルギーを利用し、更に産業改革を進めようと意欲を感じるが、如何、お考えですか。

回答：個々の企業の話はしづらいので、一般論として。中国だけでなく、ヨーロッパでもインドでも EV という声を聞くが、各国の自動車メーカーの技術や特許の状況を踏まえた将来戦略のほか、政治的な駆け引きもあろうかと思う。いろんな思惑が絡むので、私個人としてはあまり振り回されすぎずに、地元メーカーの動きを静かに応援したい。

座長：最後に教育の重要性を強調されたが、全く同感です。

## 公開パネル討論会「エネルギー・放射線教育 in 愛知」スナップ写真集
## (2017 11 23 名古屋大学 東山キャンパス)

１．参加受付風景

2．ブース展示風景

３．理事長挨拶

4. 今田宗孝先生による実践報告

5. 大津浩一先生による実践報告

6．中部経済産業局の伊藤周広氏の講演を聞く参加者

７．パネル討論「理科と社会科をつなげる授業を考える」

８．公開パネル討論会終了後の懇親会風景

# 知りたい！　エネルギーの？　電気の？

## 体験して学ぶ

科学技術館（東京・北の丸公園内）の「デンキファクトリー」，「アトミックステーション・ジオラボ」では，エネルギーや電気について，見て，触って体験できる展示を行っています。

科学技術館は日本科学技術振興財団が運営しています

公益財団法人 日本科学技術振興財団・科学技術館
Japan Science Foundation / Science Museum

## データで学ぶ

電気事業連合会及び電力各社ホームページには，エネルギーや電気について，役立つ情報がいっぱいです。

**まずは検索！** 電事連 検索 （http://www.fepc.or.jp）

**電気事業連合会**

TECHNOL

千代田テクノルは
放射線
を 測る
から 守る
で 治す

放射線は危険な性質を持っている反面、
有効に利用すれば人類に大きなメリットを与えてくれる無限の可能性をそなえています。
千代田テクノルは、医療・原子力・産業・放射線測定などの各分野において、
放射線を安全に有効利用するための機器やサービスをトータルに提供。
放射線の「利用」と「防護」の双方において、お客様のあらゆるニーズにきめ細かく対応しています。

株式会社千代田テクノル
U R L: http://www.c-technol.co.jp
e-mail: ctc-master@c-technol.co.jp
千代田テクノル 検索

ISO 9001
JQA-QM8513
Tokyo・Osaka
Kashiwazaki Kariwa

MOVE THE WORLD FORWARD MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

ものづくりの力で、この世界を一歩ずつ前に。陸、海、空、そして宇宙に、三菱重工グループ。

三菱重工業株式会社　パワードメイン　原子力事業部
〒108-8215　東京都港区港南 2-16-5　TEL. 03-6716-3111　www.mhi.co.jp

三菱重工