

放射線・RI塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 1

☞ 日本における X 線の初期の研究 (1896 年)

清 水 榮



日本における X 線の初期の研究 (1896 年)

1896(明治29)年の初頭、当時 Berlin に留学中の長岡半太郎(1865~1950)により我が国に Röntgen による X 線の発見が伝えられるや、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(1854~1931)、鶴田賢次助教授(後教授:1869~1918)が1896(明治29)年3月中旬より実験を開始したが、同じころ第一高等学校において水野敏之丞教授(1862~1944)、山口鋭之助教授(1862~1945)も実験を開始した。医科大学の長井長義教授(1847~1929)よりシアン化白金バリウムの蛍光板が提供され、これによって人の手や、鯛、雀、蛙、鼠、小刀及び鉛筆入れ等、数10葉の X 線透過写真を撮ることに成功した。この結果は X 線研究の簡単な解説に X 線写真16葉を添え25頁の小冊子、第一高等学校蔵版「れんとげん投影写真帖」と題して同1896(明治29)年5月15日に日本橋の丸善より出版された。X 線の発見より半年後のことである。

これとは別に、東京において1896(明治29)年4月ごろより、私学済生学舎(医師の教育学舎)で物理学、生理学、生物学等を教授していた医学士丸茂文良(1862~1906)は、医科大

学時代の恩師 Julius Scriba(1848~1905)の勧めにより X 線発生の実験に取り掛かり、当時築地で写真館を経営し、種々の輸入理化学器具を持っていた有名な鹿島清兵衛(1866~1924)より必要な器具を借りて、X 線発生に成功した。丸茂はその成果を同年5月31日の済生学舎校友会の例会で“レントゲン氏の所謂 X 光線?のデモンストラチオン”と題して講演し、実演してみせ、来聴者1,300人以上の盛会で拍手喝采を浴びた。このときの記録は済生会医事新報の1896(明治29)年6月号に掲載されている。丸茂文良は物理学への造詣も深く、帝国大学にいたころ、医科大学選科の物理学を担当したり、東京高等師範学校で物理学を教えていた飯盛挺造(1851~1916)の助手をしていたこともある。

一方、京都においても Röntgen の X 線発見の報が2~3か月後に達するや、当時第三高等学校教授の村岡範為馳(1853~1929)は直ちに X 線の実験を開始した。

村岡は1853年10月14日鳥取藩士村岡家の長男に生まれ、1870年貢進生として大学南校に入学、1878年 Strasbourg 大学の August A. E. Kundt 教授(1839~1894)のもとに留学した。そこで当時講師であった Röntgen と同門の友と

して親交を結ぶことになった。その後村岡は1886年第一高等学校教頭、1891年東京音楽学校校長になり、同年“魔鏡に就いて”の論文で我が国学位の第1号として理学博士になった。次いで1893年第三高等学校教授となり、1896年初頭にRöntgenのX線発見の報に接した。

彼は直ちに助手槽谷宗資(1869~1926)と実験を開始したが、2代目島津源蔵(1869~1951)、源吉(1877~1955)の兄弟がこれに協力して、実験は京都市木屋町二条の当時の島津製作所本社の実験室で行われた。始めは使用したCrookes管が排気不十分で、感応コイルの電圧も不足して苦労したが、X線管は京都府立医学専門学校教諭笠原光興(後京都帝国大学医科大学内科学初代教授:1864~1913)がドイツより持ち帰ったCrookes管を用い、これに印加する高圧電源として当時島津で製作した直径約1mのガラス円盤より成る大型のWimshurst起電機を使用して成功した。1896年10月10日に初めて鮮明な写真を得た。X線発見より遅れること11か月である。当時用いたCrookes管は現在も京都大学に保管されている。

村岡は京都府教育会で同年7月9日にX線について講演をした。そのとき、上記の水野、山口両氏の撮ったX線写真を示した。これは「レントゲン氏X線放射線の話」という小冊子になって8月31日に京都市の村上勘兵衛書店より発行された。これが我が国における放射線に関する最初の教科書とも言うべき本である。Röntgenは1901年12月第1回のNobel物理学

賞を受賞のときは、その夜の祝賀晩餐会で簡単に謙虚な謝辞を述べたのみで、病身の夫人の身を案じ、直ちにMünchenに帰ったが、その後MünchenでNobel賞第1号の祝賀会が開かれたとき、村岡範為馳はRöntgenの友人として招かれ、唯一の日本人として参列している。

なお1897(明治30)年6月京都帝国大学が創設されるや、その理工科大学の物理学教授に村岡範為馳(1913年退官)及び上記の山口鋭之助(1905年1月学習院次長兼教授ついで宮内省図書頭になる)が任ぜられ、水野敏之丞はその翌年助教授、ついで教授に任ぜられた(1923年退官)。ここに我が国でのX線研究の揺籃期に活躍した3氏は共に同じ京都の物理学教室の人となって、その発展の基礎を築いた。

東京帝国大学医科大学第一医院外科教室には1898(明治31)年にJ. Scriba講師がドイツより持ち帰ったX線装置が、また同じ年に陸軍軍医学校ではドイツSiemens社より輸入したX線装置が医療用に設置された。最初の国産の医学診断用X線装置は島津製作所が製作して、1908(明治42)年に千葉県市川の国府台の陸軍衛戍病院に納品したものである。第2号は1911(明治44)年になって大津市の日本赤十字社大津支所が購入設置した。X線発見の翌年1896年以来、上述の他、我が国各地で開かれた医学会や医学専門の学校でX線に関する講演や実演・実習が、10年程の間に枚挙に暇なきほど広く行われ、急速に普及していった。

放射線・RI塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 2

☞ P. Curie と M. S. Curie 夫妻による 新放射性元素 Po 及び Ra の発見 (1898 年)

清水 榮



P. Curie と M. S. Curie 夫妻による 新放射性元素 Po 及び Ra の発見 (1898 年)

Rutherford Pierre Curie (1859 ~ 1906) は、Paris で開業医をしていた Dr. Eugène Curie の次男として 1859 年 5 月 15 日に生まれた。父は自宅に実験室を設けて動植物の研究をするほど博物学の篤学の士であり、母は工業家の娘で、夫と 2 人の息子のために家庭を守った貞淑な夫人であった。3 歳半上の兄 Jacques は Sorbonne (Paris 大学) で鉱物学と結晶学を修め、研究者として大成した人である。Pierre は中学、高等学校にも通わず、家庭教育を受けて大学入学資格を取り、1878 年に Sorbonne で物理学修了試験に合格し、物理学の助手をして学生の実験の世話をする傍ら、結晶学や磁気の研究をした。

ピエゾ電気¹⁾は 1880 年に Curie 兄弟によって電気石で発見された現象である。1882 年に新設の市立工業物理化学学校 (École de physique et de chimie industrielle) の実習主任になって、多忙のうちにも研究を進め、常磁性体の帯磁率が絶対温度に逆比例するという Curie の法則を発見した。強磁性体が突然常磁性体になる転移温度を Curie 温度というのは彼のこの方面の業績を記念している。

ポーランドの貧乏女学生、後に M^{me} Curie²⁾ になった Marie Sklodowska (1867 ~ 1934) は、Warszawa の中学校の物理学教師 Vladiska Sklodowska の 4 人姉妹の末子として 1867 年 11 月 7 日に生まれた。中学、高等学校を修了し、1891 年 10 月に Sorbonne で物理学を勉強するために Paris にやってきた。1893 年、物理学修了試験を第 1 位の成績で、また翌 1894 年には数学修了試験を第 2 位の成績で合格した。このころすでに一流の物理学者になっていた Pierre Curie と知り合い、翌 1895 年 7 月に結婚した。彼女は当時 Sorbonne の Gabriel Lippmann 教授 (1845 ~ 1921) の実験室に勤めていたが、1896 年 2 月に Becquerel が U の放射能を発見するや、Curie 夫妻はこの新しい現象に興味をひかれ、この方面の研究に進むことになった。

M^{me} Curie はこの 2 年後に Th の放射能を発見したが、この発表はドイツの G. C. Schmidt の発見の報告より 2 か月遅れてしまった。しかしこの 1898 年に、Curie 夫妻は当時オーストリア帝国領に属していた Bohemia に 16 世紀よりある鉱山 (初めは銀、その後は鉛や少々のニッケル、コバルトを産出し、19 世紀になるとウラン鉱を産出することで知られていた St. Joachimsthal 鉱山) より出る U を含む pitch-

blende という鉱石の放射能はUの含有量から期待されるものより4~5倍も大きいことを知り、この中に2つの放射性元素が含まれていることを複雑で苦勞の多い化学操作の結果発見するに至った。1つは化学分析でBiと一緒に分離された元素で、Uよりも数百倍強い放射能を有する沈殿を作り出した。

この新しい放射性元素の発見は7月18日に Académie des Sciences に報告され、彼女の祖国ポーランドにちなんで polonium (Po) と命名された。

Pierre Curie et M^{me} Curie : “Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pitchblende,” *Compt. rend.*, **127**, 175 178 (1898).

この論文には、実験が市立工業物理化学学校(前掲)で行われ、化学実験主任の Gustave Bémont (1857~1932) の助言と協力を得たことについての感謝の言葉が付記されている。

もう1つの方は、さらにUに比して百万倍以上強烈な放射能を有する新元素で、pitchblende の化学分析では常に Ba と一緒になって分離が困難であった。しかし、塩化物の状態において分別結晶法という M^{me} Curie が初めて用いた分離操作を繰り返すと、放射能の強い新元素は溶けにくい方に少しずつ濃縮されていき、Ba より分離され、ほぼ純粋な塩化物として取り出すことができた。しかし、これが新元素である確認には、分光分析に熟達した Eugène Anatole Damargay (1852~1904) の協力が必要であり、スペクトルの観測によって最終的に新元素であることを証明したのである。

この塩化物として得られた強烈な放射性新元素は、暗闇で美しく光るので、radium (Ra) と命名された。Ra の発見は、この困難な仕事に協力した誠実な助手 G. Bémont も共著者に加え、Curie 夫妻と3名の名前で12月26日に Académie des Sciences に報告された。

Pierre Curie, M^{me} Curie et G. Bémont : “Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende,” *Compt. rend.*, **127**, 1215 1217 (1898)

“radio-active” という術語は、この年 Curie 夫妻により、自発的に放出される放射線について導入されたものである(これについては1901~1903年の「原子の放射能崩壊説」の項参照)。

その後、翌1899年より1900年にかけて Curie 夫妻は、M^{me} Curie の名前で、または共著で各々5及び3篇の論文を次々発表しているが、1900年に Paris で開かれた物理学の国際会議で、両者の共著で新しく発見された Po と Ra 及びそれより放出される放射線について詳しい報告を行っている。

M^{me} Curie et Pierre Curie : “Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu’elles émettent,” *Rapports présentés au Congrès international de Physique*, t. III, 79 114 (1900).

この論文に彼等が正確に放射能の強度を測定した方法が述べてある。2枚の平板電極(コンデンサー)を有する電離管の下に平板電極(-)の上に試料を置き、放射線によるイオン化電流を上電極(+)に結ばれた敏感な電位計に導く。この電位計を用いて、ピエゾ電気発生用の水晶に重りをかけて生ずる電位差によって正確に打ち消すように重りを調節する巧妙な方法で、放射性物質より出る放射線によるイオン化電流を正確に知り、その強度を測定したのである。

Ra の発見を初めて報告したのは1898年12月26日であるが、この研究の途中でRaを純粋な塩化物または単体の金属として取り出し、その原子量を測定し、元素として確立するためには膨大な量の pitchblende が必要なことに気が付いていた。pitchblende は高価な鉱石であったが、当時オーストリア帝国領であった St.

Joachimsthal 鉱山には、銀や鉛また U を抽出した鉱石の残渣が大量に野積みになっており、始末に困っていることに目をつけた。1898 年 9 月に P. Curie は Wien 在駐のフランス大使とオーストリア外務省を通じて Wien の科学アカデミー (Wiener Akademie der Wissenschaften) に pitchblende の残渣を供給してくれるように依頼した。時の科学アカデミーの総裁であった Wien 大学の地質学教授 Eduard Suess (1831 ~ 1914) の非常な好意をもって政府の鉱山局と交渉した結果、この pitchblende の残渣が Curie 夫妻に提供されることになり、1898 年中には早くも 100 kg が Paris に送られてきた。これは一切無料であった。1898 年 11 月 7 日付けで P. Curie は Ed. Suess 教授に感謝の手紙を出している。翌 1899 年 12 月末に 1 トン、1900 年 2 月には 5 トンが運賃のみの価格で送られた。その後 1902 年 8 月、1904 年 6 月、1905 年 10 月に各々 5 トンが送られている。1902 年には Paris の Académie des Sciences が pitchblende の残渣を購入する費用として 20,000 Fr を出してくれた。また、1903 年には Edmond de Rothschild もこのために資金の援助を申し出ている。

P. Curie は 1904 年に Sorbonne の物理学教授になったが、1906 年 4 月 19 日に不慮の交通事故のため 49 歳の若さで突如偉大なる生涯を終えたのである。この年の 12 月にも 2.5 トンの pitchblende の残渣が M^{me} Curie の許に送られてきている。

1898 年 12 月の Ra 発見の報告の後、Ra を新元素として確立するためには、純粋なる塩化物あるいは金属を得て原子量を決定しなければならないので、膨大な量の pitchblende の残渣より微量な Ra を抽出するという、生活苦のうちに非常なる肉体的労働を要する苦闘の 2 年余りを、M^{me} Curie は P. Curie とともに市立工業物理化学学校の全くみすばらしい小屋のような実験室 (Paris の 42 Rue Lhomond にあった) で過ごした。

数トンの pitchblende の残渣の化学処理の 2

年余の努力の結果、1902 年 3 月に 0.1 g の純粋な Ra 塩化物 (RaCl₂) を得て、原子量を Ba より遥かに大きい 225.93 と決定し、化学的性質も知ることができ、Ra は元素としての地位を確立することができたのである。彼女はこの研究で 1903 年に Sorbonne より国家博士の学位を授けられた。P. Curie が逝くまでに、研究室には 1 g 以上の Ra があった。M^{me} Curie は P. Curie の没後も Ra 抽出の仕事を続け、1907 年には André Louis Debirne (1874 ~ 1949) の協力を得て金属 Ra を得ることに成功している。P. Curie は、Po, Ra の発見後も精力的に研究して、1906 年 4 月に交通事故による不慮の死を遂げるまでに 10 篇以上の論文を発表している。このうちで注目すべきは、Ra が放置しておくだけで絶えず熱を発生するという発見、また H. Becquerel と Ra より放射線の生理学的効果について気が付いたことである。

M^{me} Curie は P. Curie の死後、直ちに Sorbonne の物理学講師になり、1908 年になって正式に教授になった。1911 年 8 月には Ra の標準線源として使用し得る純粋な RaCl₂ の 21.99 mg を調製することができた。また 1912 年には Académie des Sciences の会員になった。第一次大戦が勃発するや、直ちに X 線治療隊を組織して、負傷兵の治療に大活躍した。1914 年には Paris の Rue Pierre Curie に Paris 大学付属の Institut du Radium が設立され、その中の Curie Laboratoire を主宰するところとなった。1934 年 7 月 4 日 M^{me} Curie は永年の放射線障害による悪性貧血症によって Mont Blanc 山麓の St. Gervars の近くの療養所で偉大なる生涯を閉じた。その翌年に出版された彼女の名著 “Radioactivité” は、Sorbonne の講義を基にしたものである。

放射能の発見により H. Becquerel は 1903 年度の Nobel 物理学賞を受賞しているが、同時に Pierre Curie, Marie S. Curie 夫妻は「Henri Bec-

querel 教授によって発見された放射線現象について彼らが協力してなした偉大な業績を認めて」1903年度 Nobel 物理学賞を Becquerel とともに授与された。Becquerel は授賞式の翌日 12 月 11 日に Nobel Lecture を行っているが、P. Curie は 1905 年 6 月 6 日に行っている。このときは M^{me} Curie の Nobel Lecture はなかった。

また、M^{me} Curie は「新元素 Ra と Po の発見ならびに Ra を分離し、この注目すべき元素の性質及びその化合物の研究によって化学の進展に寄与した」ことに対して 1911 年度の Nobel 化学賞を授与されている。Nobel Lecture は 1911 年 12 月 11 日に行っている。1 人で物理学と化学の Nobel 賞を授与されたのは彼女のみである。

夫人の苦難にみちた輝かしい生涯は、1937 年に次女 Eve Curie の著した有名な “M^{me} Curie 伝”¹⁸⁾によって詳しく伝えられ、全世界の人々

に非常な感銘を与えたことは周知のごとくである。

【編集委員会注】

- 1) ピエゾ電気：チタン酸バリウムなどの結晶では、特定の方向に力を加えると応力に比例した電気分極が発生し、一對の結晶表面に正負の電荷が生じる。この現象を圧電効果と言い、ここで生じる電気をピエゾ電気と言う。ピエゾ電気が生じるかどうかは物質の結晶構造による。
- 2) M^{me} Curie の M^{me}：フランス語の Madame (夫人, 婦人) の意味である。
- 3) 原書名は “MADAME CURIE” (1938 年刊行)。日本では、(株)白水社から「キュリー夫人伝」として川口篤、河盛好蔵、杉捷夫、本田喜代治氏共訳により翻訳、出版されている(初版：1938 年発行、最新版：1988 年に新装版として発行)。



キュリー夫妻の受賞したノーベル賞

放射線・RI塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 3

- ☞ α 線, β 線及び γ 線の発見 (1899 ~ 1900 年)
- ☞ Ra の γ 線の生理作用の発見 (1900 ~ 1901 年)
- ☞ Ernest Rutherford による原子の放射能崩壊説 (1901 ~ 1903 年)

清 水 榮



α 線, β 線及び γ 線の発見 (1899 ~ 1900 年)

Röntgen の X 線の発見後 Cambridge の Cavendish Laboratory では, J. J. Thomson が X 線による気体の伝導性すなわち電離の研究を進めてきたが, Becquerel の U の放射能の発見により U より放射される Becquerel 線についても同様の性質のあることを知って, これについても研究を進めた。

当時まだ J. J. Thomson の許にいた Ernest Rutherford (1871 ~ 1937) は, これに協力したが, 1898 年より彼は Becquerel 線の気体の電離作用を利用して, この線の Al 箔による吸収を測定している。彼は 0.005 mm 厚の Al 箔を重ねてゆき, これの透過率を測定して, U よりの放射線は Al 0.02 mm ほどで阻止される部分と, Al 0.06 mm 以上でも透過してくる部分の 2 つの成分よりなっていることを知った。ごく薄い Al 箔にも吸収される前者を α 放射線, Al 箔の厚さを増しても (0.1 mm) 透過してくる部分を β 放射線と名付けた。Rutherford は電離槽の気体

の種類・圧力, 吸収体箔金属の種類を変えるなど, 多くの実験をしている。

さらに, そのころ Schmidt によって発見された Th よりの放射線についても同様の測定をし, Th の場合に β 線の透過率すなわちエネルギーが U の場合より強いものが存在するのを知った。ごく初期のころの放射線・放射能の研究は, 気体を伝導性にする性質を利用して, 電離作用を敏感な電位計を用いて測定した。Rutherford の多くの実験研究は 1899 年 1 月に 54 頁の見事な論文として発表された。

“Uranium Radiation and Electrical Conduction Produced by It,” *Phil. Mag.* v, **47**, 109 163 (1899)

Rutherford はこの論文の 4 の最後に,
“As far, however, as the experiments have gone, the results seem to point to the conclusion that the β radiation is approximately homogeneous, although it is possible that other types of radiation

of either small intensity or very great penetration power may be present.”¹⁾

と述べて、より透過力のある放射線の存在を暗示している。

1900年4月になって Paris の École Normal Supérieure を卒業して、その化学実験室で研究をしていた Paul Villard (後に Académie des Sciences 会員: 1860~1934) が写真乾板を重ねたものに Ra の放射線束を斜めに当てて、すべての乾板に感光する極めて透過力の強い線が放出されていることを確認した。これを彼は γ 線と名付けた。

“Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons deviables du radium,” *Compt. rend.*, **130**, 1010 1012 (1900);

“Sur le rayonnement du radium,” *ibid.*, **130**, 1178 1179 (1900)

Ra の γ 線の生理作用の発見 (1900~1901)

ドイツの化学者 F. O. Giesel は 0.27 g の RaBr_2 をセルロイドの二重のカプセルに入れ、腕の内側の皮膚に密接させて2時間おくと皮膚が赤くなり、さらに2~3週間経つと皮膚に炎症を生じて²⁾癒りにくくなることを発見した。これにより Ra より γ 線が生理的作用を及ぼすことが明らかになった。木の葉に γ 線を照射すると、クロロフィルが消失することも見ている。F. O. Giesel はこれに関して1900年の12月に報告している。

“Über radioaktive Stoffe,” *Ber. d. Deutschen chem. Ges.*, **33**, 3569 3571 (1900)

同じころ Paris の H. Becquerel は、チョッキのポケットに Ra 塩を入れたガラス管を入れたままにして、同様な炎症を起こした。F. O. Giesel の報告を聞き P. Curie は、Ra の生理作用

をたしかめる目的で、自分の腕を Ra の γ 線に曝してみても火傷のような炎症が生じ、これが癒るのに数か月を要することを知った。これは両名の名前で1901年6月3日に Académie des Sciences に報告された。

Henri Becquerel et P. Curie : “Action physiologique des rayons du radium,” *Compt. rend.*, **182**, 1289 1291 (1901)

さらに、その後 P. Curie 等により、Ra の emanation³⁾ も生理的作用をもつことが試された。

Ch. Bouchard, P. Curie et V. Balthazard : “Action physiologique de l’émanation du radium,” *Compt. rend.*, **138**, 1384 1387 (1904)

Ra また emanation の発見後間もなく、こうした生理作用が発見され、この方面の研究が生物学、医学方面の研究者の手で急速に進められて、広く医療に応用され、いわゆる放射線治療が普及してきたのである。

Ernest Rutherford による原子の放射能崩壊説 (1901~1903年)

放射能元素及びそれより放出される放射線については数多くの研究者による実験的研究が行われてきた。

Rutherford (1871~1937) は New Zealand の南島の Nelson の近郊で、英国よりの移住民の二世の子で、車輪製造業を専業とし、かたわらに農園を営んでいた両親の12兄弟姉妹の4番目の子、次男として1871年8月に生れた。New Zealand の Nelson College を経て、Christchurch の Canterbury College に進学し、数学、物理学で第1位の成績で卒業した後、引き続いて研究に従事した。最初の仕事は、1894年11月に発表された次の論文である。

“Magnetization of Iron by High-frequency Discharge,” *Trans. New Zealand Institute*, **27**, 481-513 (1894)

その翌年、引き続き “Magnetic Viscosity” なる表題の実験研究を発表している。

Cambridge 大学は 1895 年になって他の大学より迎えた研究生にも学位を与えることになり、1895 年の秋 Rutherford は “1851 Exhibition Science Scholar” の資格と奨学金を得て、はるばる Canterbury College より Cambridge に来て Cavendish Laboratory の J. J. Thomson の許で研究することになった。

同じ日に New Zealand の Dublin にある Trinity College より John Sealy Townsend (後に Oxford の物理学教授、1868 ~ 1957) も選ばれ、同じ資格を得て J. J. Thomson の許に来た。Rutherford はまず故郷での研究の続きとして、磁気式検出器による電磁波の検出の研究をし、当時としては最長距離を隔てて電磁波を検出することに成功した。

その後間もなく J. J. Thomson の許で X 線による気体の電離作用や気体による吸収の研究と一緒に行ったが、1896 年 2 月 H. Becquerel の放射能の発見が報ぜられるや、放射能現象の研究の重要性を直ちに感じ、これより生涯を通じて放射線・放射能、原子核物理の研究に専念することになった。

J. J. Thomson の許にいた時分の、この方面の研究、 α 及び β 線の発見については「 α 線、 β 線及び γ 線の発見 (1899 ~ 1900 年)」の項に記した通りであるが、Rutherford は 1898 年 9 月 9 日にカナダの Montreal の McGill 大学の MacDonald Professor として赴任すると、直ちに主として当時同大学の Owens によって発見された Th より発生する放射性気体 emanation の研究を開始した。1900 年 5 月いったんニュージーランドの故郷に帰り、許婚者 Mary Newton と結婚し、その年の 8 月に Montreal に帰学し、研究協力者を探していた。同年 5 月、近く

の化学教室に demonstrator として赴任してきた若冠 23 歳の Frederick Soddy (1877 ~ 1956) に会い、その年 12 月より物理と化学の両方面よりの放射能の研究を協力して行うことになった。まず emanation は Th より生ずる ThX という放射性元素から発生することをつきとめた。

その後、両者の放射能研究についての精力的な共同研究が開始され、Soddy が 1903 年 3 月に London の University College の William Ramsay (Ar, Ne, Kr, Xe 等の発見者で、1904 年 Nobel 化学賞受賞者：1852 ~ 1916) の研究室に戻るまで続いた。

Rutherford と Soddy は、このわずか 2 年 4 か月ほどの共同研究の期間に 9 編の共著論文を発表している。

まず Th の化合物の放射能を詳細に研究し、2 編の共同研究論文を発表した。

“The Radioactivity of Thorium Compounds, I, An Investigation of the Radioactive Emanation,” *Trans. Chem. Soc.*, **81**, 321-350 (1902)

“The Radioactivity of Thorium Compounds, II, The Cause and Nature of Radioactivity,” *ibid.*, **81**, 837-860 (1902)

この論文 I の中で、Curie 夫妻によって 1898 年に導入された “radio-active” という術語の概念を拡張して、次のように定義している。

“The term ‘radioactive’ is now generally applied to a class of substances, like uranium, thorium, radium, and polonium, which have the power of spontaneously giving off radiations capable of passing through thin plates of metal.”⁴⁾

さらに Th や Ra より放出される emanation が、これに触れる物質に放射能をもたせることより、この気体は自ら放射性であるとともにその生成元素もさらに放射能崩壊していくことを確かめ、放射能崩壊の系列のあることを知った。このような実験的に発見した事実より、放

射能とはその性質を有する元素の原子が自発的に崩壊していく現象であると結論づけた。これはギリシャ以来、各元素の原子は永久不変のものであるという既成概念を覆したもので、科学界、特に化学者の間に一大衝撃を与えた。これに関する主な共同論文は次の3編である。

“The Cause and Nature of Radioactivity, Part I,”
Phil. Mag., vi, 4, 370 396 (Sept., 1902)

“The Cause and Nature of Radioactivity, Part II,” *ibid.*, 4, 569 585 (Nov., 1902)

“Radioactive Change,” *ibid.*, 5, 576 591 (May, 1903)

彼らは、この第3論文の最後の“ §7. The Energy of Radioactive Change, and the Internal Energy of the Chemical Atom ”の中で、放射性元素は崩壊の際にエネルギーを放射線の形で放出していると述べている。

純 Ra は U の百万倍の放射能を有し、1 g の純 Ra の emanation より 1 秒当たり放射されるエネルギーは $8,200 \text{ ergs}^5$ である。この量は固体状の Ra 化合物よりの放射線のエネルギーの約 0.4 倍である。したがって、 $2 \times 10^4 \text{ ergs per second}$, $6.3 \times 10^{11} \text{ ergs per year}$, $15,000 \text{ gram-calories per year}$ である。

このエネルギーはイオンを生成するに要するエネルギーのみを考えているので低く見積もられていて、全放射線エネルギーの一部に過ぎない。さらに注目すべきは、この第3論文の最後の頁に、こうした膨大なエネルギーは放射性元素の中に潜在しているのみならず、あらゆる元素の中に存在しているであろうことを指摘して、“atomic energy” という概念を初めて科学史上に導入した。これは Rutherford と Soddy の科学者としての自然の深奥を見通す天才的資質を示したよい例であり、20 世紀の初頭、すでに、いわゆる原子力時代の到来が、彼らの脳裏

にあったことを暗示している。

“Hence there is no reason to assume that this enormous store of energy is possessed by the radio-elements alone. It seems probable that atomic energy in general is of a similar high order of magnitude, although the absence of change prevents its existence being manifested. The existence of this energy accounts for the stability of the chemical elements as well as for the conservation of radioactivity under the influence of the most varied conditions. It must be taken into account in cosmical physics. The maintenance of solar energy, for example, no longer presents any fundamental difficulty if the internal energy of the component elements is considered to be available, i.e. if processes of sub-atomic change are going on.”⁶⁾

Rutherford と Soddy はこれらの研究を協力して行ったが、化学的方面について専ら Soddy が重要な貢献をしたのみでなく、発表論文は両者の緊密な討議の結果である。このことについては Rutherford 自身が次のごとく言っている。

“The work published by us was joint work in the full sense of the team : for Mr. Soddy not only assisted in the experimental work but also supplied many of the suggestions and explanations incorporated in our published papers.”⁷⁾

この一文は Muriel Howorth, “Pioneer Research on the Atom : The Life of Frederic Soddy” (London, 1958) の p.318 に Rutherford の手書きの原文が復刻されている。

E. Rutherford は「元素の崩壊および放射性物質の化学に関する研究に対して」1908 年度の Nobel 化学賞を授与された。

【編集委員会注】

- 1) 「しかし、実験が進むにつれて、その結果を見る限りでは、 β 線はほぼ均質であるが、 β 線のほかに、それよりも強度が小さいか、あるいは透過力の遙かに大きい他のタイプの放射

- 線が存在する可能性のあることも分かった」
- 2) 炎症とは放射線皮膚障害の1つ。皮膚が6~8 Gy以上の γ 線に被ばくすると数時間以内に毛細血管の拡張により一過性紅斑が生ずる。さらに2~4週間後、より強い紅斑が1回から数回現れる。線量が増大すると、脱毛、乾性皮膚炎、湿性皮膚炎、及び表皮の壊死が起こる。また、晩発性の影響としては皮膚癌の発生がある。
 - 3) 放射性物質から放射される放射性気体。
 - 4) 「『放射性 (radioactive)』という語は、現在、一般にウラン、トリウム、ラジウム、ポロニウムのような、薄い金属板を通過できる放射線を自然に放出する能力を有する種類に対して用いられる」
 - 5) $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$, $1 \text{ calories} = 4.2 \text{ J}$
 - 6) 「したがって、この巨大なエネルギーの蓄積が放射性元素のみに所有されていると考える理

由はない。一般に原子エネルギーは放射性元素と同程度の高いオーダーのものとして推定されるが、ただ壊変のような変化がないので、その存在が感知されないだけである。このエネルギーの存在によって、化学元素の安定性や各種条件の影響下における元素の不変性が説明される。このことは宇宙物理学においても考慮する必要がある。例えば、太陽エネルギーの維持は、その成分元素の内部エネルギーが利用され得ること、換言すれば亜原子(陽子、電子など)的变化の過程が進行していることを考えれば基本的に困難なことではない」

7) 「我々が発表した仕事は、名実ともにチームの共同研究である。なぜならば、Soddy氏は単に実験的な仕事を手伝ただけでなく、我々の発表論文に取り入れられた多くの示唆や説明を提供してくれたからである」



表紙
(第5版, 1923)
同書 p.169より

Zweites Kapitel. Quantentheorie.

§ 154. Sobald die endliche Ausdehnung eines Elementargebiets im Grbsschen Phasenraum berücksichtigt wird, erhebt sich die Frage nach dem genauen Wert der für die Zustandssumme in (190) maßgebenden mittleren Energie ϵ_n aller in dem Elementargebiet n befindlichen Moleküle. Hier gibt es von vornherein noch viele Möglichkeiten. Der ersten Fassung der Quantentheorie liegt die Voraussetzung zugrunde (§ 131), daß sämtliche in einem Elementargebiet liegenden Moleküle die nämliche Energie besitzen, so daß die mittlere Energie identisch ist mit der Energie jedes einzelnen Moleküls. Dabei bleibt aber zunächst noch offen, an welcher Stelle des Elementargebiets dieser Wert liegt.

Am einfachsten ist es, die ausgezeichneten Energiewerte an die Grenzen der Elementargebiets zu verlegen, also im Anschluß an (229a) allgemein zu setzen:

$$\int p \, d\varphi = n h, \quad (324)$$

そのころ物理の世界では...

——→ 1900 Planck の量子論発表
(「放射能研究の初期の歴史」p.60~61)

Max Planck の書いた教科書

「熱放射」Wärmestrahlung

ベルリン大学教授マックス・プランクは、黒体放射のエネルギーと温度との関係からエネルギー量子の考えに到達し、20世紀はじめにおける量子力学発展の端緒を作ったことで知られている。彼はその業績により、1918年にノーベル物理学賞を授与された。

ここに示すのは彼の「熱放射理論講義」という教科書である。同書の初版(1906)への序によると、もともとは自分が10年前に始めた熱放射理論の研究結果を一つにまとめるつもりであったが、まもなく、その基礎となった前任者キルヒホッフの仕事から始めるのが望ましいことに気づき、熱力学を基礎とした熱放射理論全体の入門教科書を作った、とある。下は、量子論について説明している冒頭部分。【個人蔵】

放射線・RI塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 4[†]

- ☞ 長岡半太郎による原子の土星模型の提唱 (1903年)
- ☞ 我が国に初めて Ra が到来 (1903年)
- ☞ 我が国で初めて温泉及び大気中の放射能測定 (1910~1913年)
- ☞ C. T. R. Wilson による霧函の発明 (1911~1912年)

清水 榮



長岡半太郎による原子の土星模型の提唱
(1903年)

東京帝国大学理科大学教授長岡半太郎 (1865~1950) は、1903年12月5日の東京数学物理学学会において原子の土星模型を提唱した。原子の中心に陽電荷球があり、その周囲の円周 (リング) 上に多数の電子が等角間隔で配置されて、等速度で回転していると考え。電子は互いに距離の2乗に反比例する Coulomb 力で反発し、中心の大きな陽電荷球に引き付けられている。こうした系は土星の系と比べて、互いに反発し合っている電子が廻っていることが異なってい

[†] 「放射能研究の初期の歴史」は清水榮氏 (故人) が生前に著したもので、本誌ではそのうちのいくつかを選んで9回にわたって連載の予定です。本書の全体の概要及び全目次については連載第1回の本年4月号をご覧ください (B5判216頁、定価2,500円、丸善京都出版サービスセンター制作・丸善発売、電話075 241 2161、2004年発行)。

る。彼はこうした系は小さい攪乱に対し安定を保つことを論じた。さらに電子群の軌道面に垂直方向、動径方向それに垂直の方位角方向への振動を考えて、線及び帯スペクトルさらに放射能の β 線や α 線の放出の説明を試みた。これは翌年2月に東京数学物理学学会記事に印刷され、ほぼ同じ内容で *Phil. Mag.* 誌に発表された。

“Kinetics of a System of Particles illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity,” *Phil. Mag.*, vi, 7, 445 455 (1904)

これが発表されると、直ちに University College of Wales, Aberystwyth の G. A. Schott 教授よりその安定性について厳しい批判が *Nature* 誌上に出て、2, 3の応酬があったが、長岡の方がこの理論のさらなる発展を行わなかった。このころ J. J. Thomson が有名な原子模型を提唱した。これは陽電荷球の内側に電子を配列したもので、長岡の模型とはこの点大いに異なっていた

が、両者とも非常に多くの電子を仮定していた。J. J. Thomson は電子の発見等それまで輝かしい業績のある碩学であったので、彼の模型の方が広くもてはやされた。

いずれにしても、数年後 Rutherford による原子核の発見、Moseley の原子番号の物理的意味の発見を経て、N. Bohr の新しい物理学の成果を踏まえた水素原子模型の発展へと進んだ道程における原子構造理論の試みであった。

我が国に初めて Ra が到来 (1903 年)

明治 36 年 (1903) 8 月、東京帝国大学理科大学教授田中館愛橘 (1856 ~ 1952) は、万国測地協会総会に出席の折、Straßburg¹⁾で当時初めて市販されることになった Ra の 5 mg²⁾ 入りのものを 2 個を購入、持参して帰国した。1 個 12 マルク³⁾ したという。帰国後、京都帝国大学の水野敏之丞教授の懇請により 1 個を京都帝国大学に譲った。この Ra は当時ドイツの F. O. Giesel が Braunschweig の Buchler という会社のキエネー工場で精製して商品として市販され出したもので、臭化ラジウムであった。

同年、長岡半太郎教授は「ラジウムと放射能做」という論文を“東洋学芸雑誌、20, No.264 ~ 267”に連載している。10月2日の「寺田寅彦日記」に「夜 物理学談話会、……長岡先生ラジウムの放射につきての諸研究を講ず。田中館先生ラジウムを見ず。」とある。11月21日、田中館愛橘教授は東京数学・物理学会にてラジウムについて講演、デモンストレーションを行った。

我が国で初めて温泉及び大気中の放射能測定 (1910 ~ 1913 年)

石谷傳市郎 (後に第一高等学校教授: 1877 ~ 1941) と真鍋嘉一郎 (後に東京帝国大学医学部物療内科初代教授: 1878 ~ 1941) は、初めて湯河原、伊豆山及び熱海温泉の放射能を測定

した。

測定は C. Engler と H. Sieveking の fontactoscope (Fontaktometer) と称する装置を用いた⁴⁾。

H. Sieveking : “Über einen neuen Apparat zur Bestimmung der Radioaktivität der Thermalquellen,” *Phys. Zeits.*, **6**, 700 703 (1905)

これは約 10 リットルの円筒金属製電離槽で、この上に Extner の箔検電器を付したもので、温泉水中に空気を吹き込み、発生した泡を乾燥剤 (CaCl₂) を入れた U 字管を通して電離槽に導き、これを槽内で回転する小円管でよく攪拌して、温泉中に含まれた Ra emanation (Rn)⁵⁾ を精密に測定した。Rn の崩壊や電離槽内に入ってくる Rn 量について細かい注意を払い、複雑な計算によって採水時における温泉水に含まれる Rn の量を Mache 単位⁶⁾ で測定している。

D. Ishitani and K. Manabe : “Radioactivity of Hot Springs in Yugawara, Izusan and Atami,” *Tokyo Sugaku Butsurigakkwai Kiji*, *ii*, **5**, 226 249 (1910)

これに引き続いて、1912 年には石谷傳市郎は台湾の北投温泉の放射能を測定して報告し、さらに石谷、真鍋両氏は国内各地の温泉についても 4 篇の論文 (英文) を同誌に発表している。1913 年になると池内本 (後に横浜高等工業学校教授: 1884 ~ 1952) 及び小野澄之助 (後に東京文理科大学教授: 1886 ~ 1944) は石谷に加わり同誌に 6 篇 (英文) の論文を、1914 年には 5 篇 (英文) を発表している。

なお 1911 年に、木下季吉 (後に東京帝国大学理学部物理学教授: 1877 ~ 1935)、西川正治 (後に東京帝国大学理学部物理学教授、理化学研究所主任研究員: 1884 ~ 1952)、小野澄之助は空気中に存在する放射能生成物について研究を行っている。6月3日に東京数学物理学会で発表し、同じ内容が 12 月に *Phil. Mag.* 誌に掲載された。

S. Kinoshita, S. Nishikawa and S. Ono; "On the amount of radioactive products present in the atmosphere," *Phil. Mag.*, vi, 22, 821-840 (1911)

C. T. R. Wilson による霧函の発明 (1911~1912年)

水蒸気によって飽和されている空間を断熱膨張によって温度を下げて、過飽和の水蒸気で満たされた空間を作り、これに荷電粒子が入射するとイオンが生じ、このイオンを核にして水滴が生ずる。これを側面から照射すれば、入射 α , β 粒子等の飛跡を肉眼で観測し、写真撮影することができる。これにもとづいて、 10^{-12} cm の極微な荷電粒子が実際にいかに飛んでいるかを可視的にした霧函が Cambridge の Cavendish Laboratory で、J. J. Thomson の門下の Charles Thomson Rees Wilson (1869~1959) によって発明、製作された。この発明によって、放射線、核物理学の研究は非常に有力な手段を得たのである。

"On a Method of making Visible the Paths of Ionising Particles through a Gas," *Proc. Roy. Soc.*, A85, 285-298 (1911)

"On an Expansion Apparatus for making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and some Research obtained by its Use," *Proc. Roy. Soc.*, A87, 277-292 (1912)

C. T. R. Wilson は 1869 年 2 月、スコットランドの Edinburgh の近くの有名な牧農家 John Wilson を父として生まれた。4 歳の折父を失い、Manchester に移り、そこで J. J. Thomson も卒業生の 1 人である有名な Owens College (後の University of Manchester) に入り、初め医者になるつもりで 18 歳のとき B.Sc. を得、さらに哲学と古典学を勉強していた。1888 年に奨学金を得て Cambridge Sidney Sussex College に入学し、医学への志を止めて物理学に進む決心

をして、学位を得た。1892 年、それまで父の代わりに面倒を見てくれていた義兄が亡くなり、経済的に困って一時 Yorkshire の grammar school の教師をしたが、Cambridge 時代の実験的研究に惹かれて Cambridge に戻り、医学志望学生の demonstrator となった。このころ、ちょうど E. Rutherford や J. S. Townsend も Cavendish Laboratory で奨学生として J. J. Thomson の許にいて、これらの人々とお茶の時間の議論を楽しんだ。1896 年に Clerk Maxwell 奨学生となり、3 年間研究に従事することができることになった。Meteorological Council のために行った空中電気の研究によって 1900 年に Sidney Sussex College の fellow となり、大学の lecturer 及び demonstrator に任命された。

1894 年 9 月にスコットランド丘陵で一番高い Ben Nevis の山頂の観測所で数週間を過ごした。この折に小山の上にかかっている雲に太陽光線が当たったときに生ずる光学現象、特に太陽のまわりの「ハロ」⁷⁾、山頂や人が霧や雲に落とす影のまわりにできる環状の虹の美しさに打たれて、同じような現象を実験室で再現したいものだと思った。1895 年になって、この目的のために湿った空気を膨張させて霧を作る実験を試みた。その結果、塵埃のない水蒸気で充たされた空気を突然膨張させて過飽和状態をつくったとき、断熱膨張前後の空気の容量を v_1 , v_2 とすると $v_2/v_1 > 1.25$ になると陰イオン、 $v_2/v_1 > 1.31$ になると陽イオンを核にして霧ができ、 $v_2/v_1 > 1.38$ になるとイオンが存在しなくても濃い霧が生ずることを見出した。それで膨張比をある範囲にしておけば、各イオンのまわりに水滴が形成されて、適当な照明下であれば、肉眼での観測または写真撮影によりその存在を知ることができる。彼は実験を重ねて 1911 年ころに初めてこの方法で α 及び β 粒子の飛跡を明瞭に観測できるに到った。これがいわゆる Wilson 霧函の最初であり、上記の 2 つの論文で発表された。E. Rutherford はこの方法こそ「科学史上もっとも独創的かつ驚嘆すべき器械

である」と言っている。

C. T. R. Wilson は 1927 年になって「荷電粒子の飛程を水滴の形成によって可視化する方法の発明に対して」Nobel 物理学賞を受賞している。

彼の Nobel 賞受賞は霧函の発明より 15 年以上も遅れた。これは 1920 年代になってから、E. Rutherford と J. Chadwick による Cavendish Laboratory での α 粒子による軽元素の人工変換の様子が霧函を使って可視的に明瞭に観測できるようになったこと、また 1923 年になって、Compton 効果が発見され、Wilson が霧函の方法を用いて、反跳電子の存在による散乱 X 線の波長変化を実験的に証明することができ、さらにその飛跡の詳細な研究により、Compton 効果の研究を進めた業績が高く評価されるようになったためである。それで 1927 年に Arthur Holly Compton (1892~1962) とともに、上記の Nobel 物理学賞を授与された。

彼の発明した霧函が原子核物理学、宇宙線の研究等の進歩に対して絶大な寄与をしたことは言を待たないところである。1918 年に Cambridge University の気象電気学の Lecturer に、1925 年には Jacksonian Professor of Natural Philosophy に任命され、1934 年までこの教授職に

あった後、1936 年に引退して Edinburgh に居を移したが、研究心は衰えをみせなかった。

彼は 80 歳になるまで山登りを楽しみ、86 歳の折、初めて飛行機に乗って旅行したといわれる。1959 年 11 月に生まれ故郷に近いスコットランドの Peeblesshire の Carlops 村で家族に見守られてその 90 年の生涯をとじた。

【編集委員会注】

- 1) ストラスブール：現フランス北東部の中心都市。1871~1918 年にはドイツ領であった。
〔仏〕Strasbourg(ストラスブール)
〔独〕Straßburg(シュトラスブルク)
- 2) Ra の純度が 100% とすれば、 ^{226}Ra 1 g を 1 Ci としていたので 185.1 MBq に相当。ただし、純粋な無水臭化ラジウム (RaBr_2) と仮定すれば 108 MBq (単体の ^{226}Ra が 1 g で 3.7×10^{10} Bq であることから、 $226 / (226 + 2 \times 79.904) \times 0.005 \times 3.7 \times 10^{10} = 108.37 \times 10^6$) に相当する。
- 3) 現在の日本円に換算するとおよそ 24,000 円位 (コラム参照)。
- 4) 現在では、液体シンチレーションカウンターが用いられる。
- 5) エマナチオン。Rn の元素名として使われた時期がある。
- 6) 1 マッヘ = 13.7 Bq/リットル。
- 7) 「量(かさ)」のこと。

明治 36 年のラジウムの値段 ...

1 個 12 マルクであったというラジウム 5 mg 線源は、現在の価格ではいくらになるだろうか？

1903 (明治 36) 年当時は、日本、ドイツともに金を通貨価値の基準とする金本位制を採用しており、日本では 1 円 = 金 0.75 g、ドイツでは 1 マルク = 金 0.35841 g と定められていた。これをもとに計算してみると、1 マルク = 0.4779 円、12 マルク = 5.73 円となる (法定レート)。米の値段を基準に当時と現在の物価倍率を出すと 4264 倍となり、このときのラジウムは 5.73 円 \times 4264 = 24,433 円相当となる。

では、明治 36 年の日本においてどのくらいの値打品であったのだろうか？ 当時の大蔵省による「東京市内商品小売相場調査」という調査結果が残っている。それによれば明治 36 年には、白米 10 kg = 1.296 円、

食塩 1 kg = 0.634 円、石油 18 リットル 2 缶入 = 3.103 円、絹糸 375 g = 7.715 円となっている。その中でラジウム 5 mg (0.005 g) = 5.73 円であった。

ちなみにその後の値段をみると、1904 年はじめのころより、がん治療への効能に注目が集まり、ラジウムへの需要は膨れあがりはじめた。ラジウムは世界でずば抜けて貴重な物質となり、1906 年までには、1 g = 約 1000 万ドル (現在の 11 億円) の値を付けたという。学術研究用の academic discount という要素を考えた場合、1903 年の購入は、結果として絶妙のタイミングであったのかもしれない。(日本銀行金融研究所貨幣博物館、総務省統計図書館のご協力による。一部、カリフォルニア大学バークレイ校のホームページを参照した)

放射線・RI塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 5[†]

- ☞ V. F. Hess による宇宙線の発見 (1912年)
- ☞ G. de Hevesy と F. A. Paneth が初めて同位元素をトレーサーとして化学反応の研究に利用(1913年); その後の Hevesy の研究活動



清水 榮

V. F. Hess による宇宙線の発見 (1912年)

地表やその近くに置かれた放射線測定用の電位計が放電すること¹⁾は、古く1902~1903年ごろより知られていた。これは地殻に微量ではあるが広く分布している U や Th からの γ 線によるもので、その中で透過力の強いものも約10 cm くらいの厚さの鉛があれば遮へいすることができた。したがって、上空に行くにつれて空気層の吸収によって放射線の強度は低下していくものと考えられていた。これに関して電位計を載せた気球を上昇させ、入射線による電離がいかに減少していくかを実験したのは

Freiburg 大学の気象学者 Albert W. F. E. Gockel (1860~1927) である。彼は1911年4月に記録計をつけた電位計を載せた気球を2,800 m の上空まで上昇させたところ、地表からの放射線の強度は大体1,000 m くらいまでは減少するが、それ以上の高度に達すると逆に強度が増していく傾向を示し、2,800 m では明らかに地表より高くなった。それで透過力のある放射線が地球外から来ており、それが太陽の位置には無関係であることを観測したのである。

Albert Gockel: "Messungen der druchdringenden Strahlung bei Ballonfahren," *Phys. Zeits.*, **12**, 595-597 (1911)

[†]「放射能研究の初期の歴史」は清水榮氏の遺作で、本誌ではそのうちのいくつかを選んで9回にわたって連載としてお届けいたします。本書の全体の概要及び全目次については、連載第1回の本年4月号をご覧ください(B5判216頁、定価2,500円、丸善京都出版サービスセンター制作・丸善発売、☎075 241 2161、2004年発行)。

A. Gockel の観測と彼が遙か高空には地球外から透過力のある Hohenstrahlen (高層放射線) が来ていると考えたことを確かめるために、Wien の Institut für Radiumforschung で Stefan Meyer 教授(1872~1949)の助手をしていた Viktor Francis Hess(1883~1964)は1912年に 3 mm

の厚さの鉄で作った²約 2 リットルと 3 リットルの電離箱に電位計を接続して測定器とし、これを気球 (1,600 m³ と 1,680 m³ の 2 種を使用) に積んで自ら乗り込み、観測を行った。この実験を行った 1912 年 4 月 17 日、オーストリアの Donau 河の北方地方はたまたま部分日蝕に当たり、気球を昼間 2,000 m 程上昇させて観測し、食による日影の部分に入っても特に電離の減少が見られなかったことを観測している。その後 4 月 17 日より 8 月 7 日にかけて 7 回の上昇を試み、最終の第 7 回目には 5,350 m の上空まで昇って放射線による電離の変化を観測している。この折には壁厚の少し薄い第 3 の電離箱を搭載して、気球の運転士、気象学者と Hess 自身の 3 人が乗り込んでいる。こうした冒険的実験の結果、電離箱に入る透過力のある放射線は大体 2,000 m ほどの高さまでは地上より減少していくが、これより高いところでは少しずつ増加していくことを観測して、地殻に含まれている放射性物質からの γ 線以外に、それまで知られていなかった透過力のある放射線が確かに宇宙より飛来していることを発見したのである³⁾。

Viktor F. Hess : “ Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten, ” *Phys. Zeits.*, **13**, 1084 1091 (1912))

前述の A. Gockel の観測でみた事実をさらに確かめようとして、ドイツにおいて Halle 大学の Werner Kolhörster (1887 ~ 1946) が、1912 ~ 1913 年、Hess と同じような測定装置を携えて気球に乗り、大気の上層における透過力のある放射線の測定をした。彼は 3 回の気球上昇を試みて、最高 6,300 m の上空にまで達し、このような上空では地殻からの放射性物質による、または大気中に存在する emanation⁴⁾ 等による放射線より 12 倍も強度の高い透過力のある放射線が地球外から大気の中に入ってくることを知った。

Werner Kolhörster : “ Messungen der durchdringenden Strahlung im Freiballon in grösseren Höhen, ” *Phys. Zeits.*, **14**, 1153 1156 (1913))

このようにして V. F. Hess と W. Kolhörster が宇宙空間のいずれかのところより地球に降り注いでいる放射線の存在を発見したのである。この両者はそれぞれその放射線について、さらに研究を展開する計画を立てていたが、第一次世界大戦の勃発により実行に移すことができなかった。戦後、研究は米国の Robert A. Millikan 一派によりさらに大きく発展した。1922 年に彼等は Texas 州の San Antonio で自記記録型の電位計を 55,000 フィートの上空まで上昇させる実験に成功し、さらにこの高層放射能について多くの事実が知られるようになった。宇宙線という名称は 1925 年ごろ Millikan により使用され始めたものである。宇宙線の研究は物理学の一大研究分野に発展し、幾多の重要な発見をもたらした。

1936 年になって V. F. Hess は「彼の宇宙線の発見に対して」Nobel 物理学賞を授与されている。同じ年に C. D. Anderson が陽電子を初めて宇宙線中に発見した業績 (1932 年の項参照) で同じく Nobel 物理学賞を授与されている。

Viktor Francis Hess は 1883 年 6 月オーストリアの Graz の北 Deutsch Feistritz の Waldstein 城の中で森林局 (Forstbeamte) に勤めていた父の息子として生まれ、1905 年に Graz の大学を卒業して学位を得て、しばらく Wien 大学の第 2 物理学教室の Franz Serafin Exner 教授 (1849 ~ 1926) の許で研究した。当時同教授は空中電気に興味を有していた。Hess は 1910 年に Wien の Kaiserliche Akademie der Wissenschaften に新たに設置された Institut für Radiumforschung の Stephan Meyer 教授 (1872 ~ 1949) の助手になって、A. Gockel の報告に刺激され、宇宙線の研究に気球を飛揚することになっていたが、第一次世界大戦後の敗戦の疲弊でこの実験を進めることができなくなった。1920 年に一時 Graz

大学の準教授に任命されたが、その翌年には渡米して New York の近くの U.S. Radium Corporation に招かれ、そこに研究所を設立し、また米国内務省鉱山局の顧問物理学者として働いた。その後帰国して 1923 年に Graz 大学の正教授に任命され、1925 年までそこに留まった。1927 年からはオーストリアや国際機関の援助のもとに北海の Helgland 島で宇宙線研究を進めるための装置を買い集めた。1931 年には Rockefeller Foundation の援助によりオーストリアの Innsbruck の近くの Hofelekar Spitz という 2,300 m の山上に宇宙線観測所を設立した。1937 年に Graz に戻ったが、その翌年ナチスがオーストリアを占領するに至り、教授職より追われて New York の Fordham 大学の教授になり、引退する 1956 年までその職にあった。1944 年に米国籍を得ている。Hess は Empire State Bldg. の塔の上で実験を続けたり、南米や太平洋にも出掛けて、宇宙線についての研究を進めた。1964 年 12 月に New York 州の Mount Vernon で死去した。

G. de Hevesy と F. A. Paneth が初めて放射性同位元素をトレーサーとして化学反応の研究に利用 (1913 年); その後の Hevesy の研究活動

Rutherford は 1907 年 9 月に Montreal より Manchester に転任してきた。その翌年 Wien の科学アカデミーより 400 mg という大量の RaCl_2 と多くの Ra 生成物を研究用に提供された。これを利用してその後の輝かしい研究が発展した。

新しい Rutherford の研究室にハンガリー生まれの若い研究者 George de Hevesy⁵⁾ (ハンガリー語で György Hevesy : 1885 ~ 1966) が 1911 年より 1914 年まで研究員として在籍した。彼は Budapest の裕福な工業家の家庭に生まれ、同地の大学で物理学と化学を修めた。さらに Berlin と Freiburg で勉強を続け、1908 年に Freiburg の大学で Ph.D. をとり、Zürich の ETH⁶⁾ の電気化学の Richard Lorenz 教授 (1862 ~ 1929) の許で助手になった。1910 年に Karlsruhe の Tech-

nische Hochschule にいた Fritz Haber (1918 年度 Nobel 化学賞受賞者 : 1863 ~ 1934) の研究室に行き、触媒作用の研究をしたいと思った。違う研究課題を与えられたので、ここを辞して放射能の研究を志し、1911 年に Manchester の Rutherford の研究室に赴いた。ここで同年輩の Niels Bohr や、後に放射能研究の碩学となった多くの新進気鋭の研究者と知り合い、生涯の親友となった。

このころ Fajans Soddy の放射性元素の変位法則が発見され、周期表上同じ位置に存在するが原子量を異にする元素の存在⁷⁾が確認され、F. Soddy はこれを同位元素と名付けた⁸⁾。同位元素は互いに化学的に全く同じ挙動をするが、Rutherford 自身はこの点についてはっきりしていなかった。1911 年のある日、彼は Hevesy にオーストリアより U 抽出の副産物としてきた半減期 20 年の $\text{RaD}^9)$ の入っている数百 kg の“放射性鉛”¹⁰⁾より RaD を分離する仕事してみないかと勧めた。その後 Hevesy は種々の化学、物理操作を駆使して分離を試みたが失敗に帰した。そこで分離不可能の RaD を利用して鉛の化学的挙動を研究することを思いついた。1912 年に Wien の Institut für Radiumforschung に赴いた。ここでは純粋な RaD が使用できるので、同様に放射性鉛と RaD の分離に非常な苦勞をして失敗したオーストリア生まれの Friedrich Adolf Paneth (最後にドイツ Mainz の Max Planck 化学研究所の所長 : 1887 ~ 1958) と一緒に 1912 年末より研究を開始した。ここではまず水に溶解した硝酸鉛中に微量の RaD を加えて鉛を RaD でラベルしたものを使用して、水に不溶性とされていたクロム酸鉛を作った。この水中での溶解度を RaD の放射能を indicator として測定して、水 1 リットル中にこれが 2×10^{-7} モルという微小な溶解度を有することをはじめて発見した。この仕事が同位元素をトレーサーとして使用した最初の研究で、1913 年 4 月に発表された。

当時オーストリア・ハンガリー帝国の首都は

Wien にあった。1913 年 4 月 24 日、ここの帝国科学アカデミー (K. Akademie der Wissenschaften in Wien) に報告された。

F. Paneth und G. v. Hevesy : " Über Versuche zur Trennung des Radium D von Blei, " *Sitzungsber. K. Akademie der Wissenschaften in Wien*, Ila, **122**, 993 1000 (1913)

ついで 4 月 30 日には下記の学術誌に投稿された。

G. v. Hevesy und F. Paneth : " Die Löslichkeit des Bleisulfids und Bleichromats, " *Zeits. f. Anorg. Chemie*, **82**, 323 328 (1913)

間もなく両人は同じ鉛の同位元素である ThB を indicator に用いて¹¹ 鉛やその他の塩類の溶解度などを測定し、分析化学で放射性元素が indicator として使用できることを実験的に明らかにした。これも帝国科学アカデミーに報告された。

F. Paneth und G. v. Hevesy : " Über Radioelemente als Indikatoren in der analytischen Chemie, " *Sitzungsber. K. Akademie der Wissenschaften in Wien*, Ila, **122**, 1001 1030 (1913)

Hevesy らはこれらの発表の翌年の 1914 年には同位元素の定義についてはっきりさせることについて論文を発表している。

G. v. Hevesy und F. Paneth : " Zur Frage der Isotopen Elemente, " *Phys. Zeits.*, **15**, 797 804 (1914)

なお、同位元素 (isotope) という用語が初めて使用されたのは 1913 年 12 月 3 日付の *Nature* 誌に投稿された Fredric Soddy (1877 ~ 1956) の論文である⁸⁾。

F. Soddy : " Intra-atomic Charge, " *Nature*, **92**, 399 400 (1913)

その後、G. v. Hevesy は Budapest の大学の第 3 化学研究室で 1918 年まで Privatdozent (私講師) として講義をし、実験的研究を行っていたが、第一次大戦の勃発とともにオーストリア・ハンガリー軍に 1918 年まで従軍している。復員してから 1919 年に Budapest の大学の員外教授となり、次いで第 2 物理研究室の正教授になった。RaD を使用して鉛の自己拡散や鉛を含む無機または有機化合物中での鉛の挙動等の研究をしている。

戦後の疲弊期である 1920 年になって Copenhagen にできた Bohr の新しい研究所に行き、1926 年 Freiburg の物理化学の正教授になるまでここで研究していた。この間 1923 年 1 月、オランダ出身の Dick Coster (後に Groningen の物理学教授 : 1889 ~ 1950) とともに N. Bohr の助言による H. G. J. Moseley の法則に従って X 線分光分析法により原子番号 72 の新元素 hafnium (Hf) を発見した。

Georg v. Hevesy : " Über die Auffindung des Hafniums und den gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse von diesem Element, " *Ber. Dt. Chem. Ges.*, **56**, 1503 1516 (1923)

D. Coster and G. v. Hevesy : " On the missing element of atomic number 72, " *Nature*, **111**, 79 (1923)

D. Coster and G. v. Hevesy : " On the new element hafnium, " *Nature*, **111**, 252 (1923)

D. Coster and G. v. Hevesy : " Über das Element der Atomzahl 72, " *Nature*, **11**, 133 (1923)

1923 年には RaD を tracer として用い、鉛の植物への吸収の研究を行った。これが放射性トレーサー技術の最初の生物学的応用である。

G. de Hevesy : " The Absorption and Translocation of Lead by Plants, " *Biochem. J.*, **17**, 439 445 (1923)

それに引き続き Bi の放射性同位元素 $RaE^{12)}$ を使い、動物(兔)体中での Bi の分布、新陳代謝を研究した。これは梅毒の治療に Bi が使用されていた¹³⁾ので、体内での Bi の挙動を知ることが重要であることに着目したのである。次いで同様の研究を ThB を用い鉛の動物体中での新陳代謝の研究を行った。これが放射性トレーサーの医学方面への利用の嚆矢である。

I. A. Christiansen, G. de Hevesy et Sv. Lomholt : " Recherches, par une méthode radiochimique, sur la circulation du bismuth l'organisme, " *Compt. rend.*, **178**, 1324 1326 (1924)

I. A. Christiansen, G. de Hevesy et Sv. Lomholt : " Recherches, par une méthode radiochimique, sur la circulation du plomb dans l'organisme, " *Compt. rend.*, **179**, 291 293 (1924)

1934 年になって Joliot Curie 夫妻が中性子照射により人工放射性同位元素を作ることになった¹⁴⁾、多くの生体に重要な放射性元素が得られた。さらに第二次世界大戦後、原子炉によって多種にわたって大量の放射性同位元素が得られるようになり、現在、科学研究、工業、医療の各方面にとって有力な手段として放射性トレーサーが広く使用されていることは周知のことである。

Hevesy と Paneth が RaD をトレーサーとして利用した 1913 年より 30 年経ち、放射性同位元素のトレーサー利用の重要性が認められ、広く行われるようになって、はじめて G. de Hevesy に「化学反応の研究における同位元素の利用の業績に対して」1943 年度の Nobel 化学賞が授与された。遅きに失したというべきである。

なお Hevesy は 1926 年に Freiburg の物理化学の正教授になって、X 線や蛍光分析による分析化学や同位元素希釈法等を開発するなど新しい研究分野を開拓していった。ナチスがドイツを支配するようになり、1934 年に再び Copenhagen の N. Bohr 研究所に戻り、中性子照射によ

る放射化学分析法を導入するなど、化学、植物及び動物生理学の分野にも研究を拡げた。

1943 年デンマークがドイツ軍に占領されるに至り、Stockholm に去り、University of Stockholm の有機及び生物化学研究室で研究を続け、スウェーデン市民となり、1959 年にその大学の有機化学の正教授になった。世界中の学界より多くの榮譽を受けた G. de Hevesy は 1966 年 7 月 Freiburg で死去した。

なお Hevesy を記念して George von Hevesy Memorial Medal と George von Hevesy Lecture Medal が設けられ、1982 年 8 月に Paris で開催された第 3 回 International Conference of Nuclear Medicine において、鉄道中央病院院長上田英雄氏に Memorial Medal、東京大学医学部教授飯尾正宏氏に Lecture Medal が贈られている¹⁵⁾。

【編集委員会注】

- 1) 電離箱で収集した電荷が、時間が経つと徐々に放電すること。
http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/16020102_1.html
- 2) 地殻 γ 線を除去するため。
- 3) 宇宙空間には高エネルギー宇宙線が存在しており、これが大気と相互作用することによって 2 次宇宙線を生ずる。2 次宇宙線の主成分はミュー粒子からなる電離成分と中性子成分である。2 次宇宙線強度は高度のほか、緯度や太陽活動によって変化することがわかっている。緯度に依存する原因は、地球磁場のために赤道付近では 1 次宇宙線の入射が困難であるからであり、また太陽活動に依存するのは、例えば太陽活動が活発化すると太陽磁場の強度が大きくなり銀河宇宙線の太陽系への入射が妨げられるからである。
- 4) Rn の元素名として使われた時期がある。
- 5) 「Hevesy」の氏名の記載は、本文中(参考文献の表記を含む)で、「G. de Hevesy」、「G. v. Hevesy」、「G. Hevesy」、「Georg von Hevesy」があるが、原則として原文のままとした。
- 6) ETH Eidgenössische Technische Hochschule (スイス連邦工科大学)。スイス連邦工科大学

チューリッヒ校（通称：ETH Zürich）は1855年創立，ヨーロッパ屈指の工学系大学として知られ，多数のノーベル賞受賞者を輩出している。アインシュタインの出身大学としても有名。

- 7) ここでは，原子量は質量数のこと。
 8) F. Soddy による同位元素の用語に関するエピソードは「Fajans Soddy の放射性元素の変位法則；Soddy による isotope（同位元素）の概念の確立（1913年）」の項参照（本連載第7回（10月号）に掲載予定）
 9) RaD は²¹⁰Pb のこと，すなわち鉛の同位体。
 10) ²¹⁰Pb のこと。
 11) ThB は²¹²Pb のこと。

- 12) RaE は²¹⁰Bi のこと。
 13) ビスマス化合物は，粘膜や潰瘍面に適用すると局所の蛋白を結合沈殿して不溶性の皮膜を形成し炎症を抑制する。またその結果，微生物の発育を阻止し疼痛効果を示すことから，かつて梅毒の治療に用いられていた。
 14) 「Frédéric Joliot Curie と Irène Joliot Curie 夫妻による人工放射能の発見（1934年）」の項参照（本連載第9回（12月号）に掲載予定）
 15) Hevesy の名前を付けた国際的な賞としては，放射化学分野で顕著な成果をおさめた研究者に贈られる Hevesy Award があり，日本人としては東北大学名誉教授鈴木信男博士が受賞している。

清水 榮 著 『放射能研究の初期の歴史』 より

本誌で掲載する項目一覧

4月号	1896：日本における X 線の初期の研究
5月号	1898：P. Curie と M. S. Curie 夫妻による新放射性元素 Po 及び Ra の発見
6月号	1899～1900：α 線，β 線及び γ 線の発見 1900～1901：Ra の γ 線の生理作用の発見 1901～1903：Ernest Rutherford による原子の放射能崩壊説
7月号	1903：長岡半太郎による原子の土星模型の提唱 1903：我が国に初めて Ra が到来 1910～1913：我が国で初めて温泉及び大気中の放射能測定 1911～1912：C. T. R. Wilson による霧函の発明
8月号	1912：V. F. Hess による宇宙線の発見 1913：G. de Hevesy と F. A. Paneth が初めて同位元素をトレーサーとして化学反応の研究に利用；その後の Hevesy の研究活動
9月号	1912～1915：石津利作による我が国温泉及び鉱泉の放射能調査 1913：Niels Bohr の原子構造論
10月号	1913：Fajans Soddy の放射性元素の変位法則；Soddy による isotope（同位元素）の概念の確立
11月号	1928：自由電子による輻射線（X 線，γ 線）の散乱に関する Klein 仁科の公式；仁科芳雄の活動
12月号	1934：Frédéric Joliot Curie と Irène Joliot Curie 夫妻による人工放射能の発見

放射線・Ri塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 6[†]

☞ 石津利作による我が国温泉及び鉱泉の放射能調査
(1912~1915年)

☞ Niels Bohr の原子構造論 (1913年)

清水 榮



石津利作による我が国温泉及び鉱泉の放射能調査 (1912~1915年)

P. Curie, Marie S. Curie 夫妻の Ra の発見後, Ra により生成される放射性気体ラドン (Rn) が鉱泉中に含まれていることが発見された。これが鉱泉の医療効果の一因子なることが喧伝されるに至り, 内務省でも本邦の鉱泉中の Rn の調査の必要を感じ, 内務省東京衛生試験所の調査部長石津利作 (1877~1927) がこれを行うことになった。1912年より4年間にわたり, 部下の衣笠豊 (後に内務省東京衛生試験所長: 1881~1964) その他とともに当時交通も不便な中を全国津々浦々に到る約600の温泉及び鉱泉の現地調査に赴き, 含有化合物, イオン及び放射能 (主として Rn, 一部 Tn を含む) を測定した。当時は山間僻地への交通の困難は非常

なものがあり, これは本邦での最初の大規模な科学調査であった。この調査により鳥取県の三朝温泉が当時我が国第1の Rn (一部 Tn を含む) 温泉であることが分かり, 世界でも知られた。Curie 夫人の有名な放射能の教科書 (Radioactivite, Paris, 1934) にも2, 3の温泉について, この調査のデータが載っている。この調査は石津の手によって英文にまとめられ, 多くの写真図版と詳細な測定データを示した430頁にも及び大冊 (菊版) “R. Ishizu: The Mineral Springs of Japan (Sankyo, Tokyo, 1915)” になり, 1915年米国 San Francisco で開催された Panama Pacific International Exposition に提示された。この本は現今でも比類を見ない立派な温泉誌である。ただし, 温泉の成分, 放射能 (Rn あるいは Tn) の強度は日々, 年々, 変化しているので現在この本のデータが現状を正しく示しているとはいいがたい。

当時, 石津等の調査により三朝温泉は本邦第1, 世界でも第2位の強さのラドン温泉であることが分かった。Ra の発見者 Curie 夫人の命日に当たる6月4日に「キュリー祭」を催し, 祭壇には Curie 夫人と石津利作博士の写真が飾ら

[†] 「放射能研究の初期の歴史」は清水榮氏の遺作で, 本誌ではそのうちのいくつかを選んで9回にわたって連載しています。本書全体の概要及び全目次については連載第1回の本年4月号をご覧ください (B5判216頁, 定価2,500円, 丸善京都出版サービスセンター制作・丸善発売, 電話075-241-2161, 2004年発行)。

れて、来会者は感謝と三朝温泉の繁栄を願って黙祷を捧げ、知事、県会議長などからも祝辞が述べられてきたという。現在「キュリー祭」は毎年8月3~4日に行われている。

Niels Bohr の原子構造論 (1913年)

Niels Hendrik David Bohr (1885~1962) は1885年10月デンマークの首都Copenhagenに生まれた。父Christian Bohrは同地の大学の生理学教授、母Ellenは同じ大学でデンマークとしては初めて物理学のmasterの学位を得た2人の女性の1人で、後に自ら学校を創立して、男女共学など新しい制度を取り入れた極めて教養の高い婦人であった。母方の祖父はデンマーク在住の有名なユダヤ人一族の出身で、大銀行家であった。Nielsには2歳年上の姉と、2歳年下の弟Harald(後に数学教授になる)があった。彼の育った家庭には始終著名な学者、すなわち哲学者Herald Høffding (1834~1931)、言語学者Vilhelm L. P. Thomsen (1842~1927)、物理学者Christian Christiansen (1843~1917)らが集まってきていた。彼らの議論は認識論上の問題が多かった。Bohr家の子供達は幼少のころよりこうした人々に親しみ、学問の香りの極めて高い家庭に育ったのである。2人の兄弟は仲良く、少年時代はフットボールに熱中したが、共に大学に進みNielsは物理を主として化学、数学を学んだ。大学生時代の1907年には液体の表面張力の研究で王立科学文芸アカデミーより金賞を授与されている。その後Christiansen教授の指導の許に金属の電子論の研究に進み、1907年12月にmasterの学位を、1911年3月にPh. D.の学位を得た。

この年の9月にCarlsberg Foundationの奨学金を得てCambridgeのJ. J. Thomsonの許に留学することになった。J. J. Thomsonは英語に不慣れな若い明晰なデンマークの青年に親切であったが、彼の持参したPh. D. thesisの金属の電子論の論文を読んでくれなかった。J. J. Thom-

sonはすでにこの方面への興味を失っていたのである。しかし、Cambridge在住中にたまたまManchesterより来訪したRutherfordの講演を聴き、彼の放射能に関する活発な研究に大いに惹かれて、1912年3月よりManchesterの彼の研究室に移り、7月下旬まで留学した。当時、Rutherfordの研究室ではH. G. T. Moseleyの実験が進行中で、 α 粒子散乱のGeiger Marsdenの測定が行われたところで、Rutherfordのこれに基づく原子核発見の論文が出たころであり、G. von Hevesyもハンガリーより留学中であった。また、H. Geiger, J. Chadwick, J. M. Nutall等々気鋭の若手がそれぞれRutherfordの許で研究中であった。Nielsはこれらの俊英に伍して、Rutherfordがその当時提唱した原子核の存在に大いに刺激され、C. G. Darwinと議論しながら、彼の原子構造論の構想に打ち込んでいた。Nielsは1912年7月末にいったんCopenhagenに帰り、結婚し、彼の原子構造論に全力を傾注した。

すでに1900年にMax Planckの量子論が、1905年にはAlbert Einsteinによる光子説及び特殊相対論が提案されていた。古典力学や電磁気学が適用できない物理学現象が解明されてきたことに想いを致し、さらにRutherfordの原子核の発見を見てNielsは新しい革新的な構想の許に原子構造の模型として水素原子を考えた。

すなわち、1) 原子の中心にはRutherfordが見いだした原子核が存在する。2) その周囲に電子が特定の円運動の定常軌道を回転している。電子の質量を m 、速度を u 、円運動の半径を r とすれば、原子の内部ではPlanck定数 h が安定条件を支配して $eu \cdot 2\pi r = mh$ ($m=1, 2, 3, \dots$)になる。この仮定を量子条件と呼ぶ。3) 1つの定常条件(エネルギー E)にある系が、外からの何らかの影響で、エネルギーの低い(E')の他の定常状態に遷移するときには $\nu = (E - E')/h$ で表されるエネルギーが $\nu h = E - E'$ の光子の形で放出される。という3つの大きな仮定の上に水素原子模型を考えた。

これにより、すでに判っていた水素の線スペクトル Balmer 系列やスペクトル項を結びつける Rydberg 常数の実験値と驚くべく一致した数値を理論的に導いて、原子構造論の基礎を築いた。Niels Bohr の原子模型の理論は 3 篇で 1913 年に発表された。

1) “On the Constitution of Atoms and Molecules,” *Phil. Mag.*, vi, **26**, 1 25 (1913)

この原子構造の量子論の論文は 1913 年 3 月に Bohr が Copenhagen で仕上げ、Rutherford の許に送って批判を仰ぎ、少々筆を加えた後で *Phil. Mag.* 誌に発表されたものである。論文の最後の日付は 1913 年 4 月 5 日になっている。

2) “On the Constitution of Atoms and Molecules, II, System containing only a Single Nucleus,” *Phil. Mag.*, vi, **26**, 476 502 (1913)

この第 2 論文は Bohr が 1913 年 6 月に Manchester に赴き、Rutherford の批判、助言を求めている。これには放射能の変位法則、Barkla 放射¹⁾の起源、数個の電子を含む原子の基底状態等を論じている。

3) “On the Constitution of Atoms and Molecules, III, Systems containing Several Nuclei,” *Phil. Mag.*, vi, **26**, 857 875 (1913)

Bohr は、研究の成果を 1913 年にこのように画期的な論文として次々発表したが、1913 年に帰国した Copenhagen では大学講師の席しか得られず、それも研究を進めるために有利なものではなかったので Rutherford と終始密接に連絡していた。1914 年春になって Rutherford より Manchester で数理論物理学の Leadership の席が空いたのを提供してくれた。この年初秋に Manchester の物理学教室に Leader の資格で赴任し、再び Rutherford の研究室の人となった。2 年余り経って 1916 年 University of Copenha-

gen に彼のために理論物理学の教授職が設立されたので、再び Copenhagen に帰った。オランダ人 Hendrik Antonie Kramers (1894 ~ 1952) が最初の助手であった。やがて 1921 年 3 月に理論物理学研究所が設立され、Niels Bohr はその所長になった。所員として、G. von Hevesy, James Franck (1882 ~ 1964) らが最初に入ってきた。Bohr は 1962 年 11 月に亡くなるまで所長を務めたが、理論物理学研究所が世界の理論物理学研究のメッカとして、40 か国以上の国々より 600 名以上の人々がここに来て研究したことは周知のことである。なお Bohr は上記 3 篇の論文の後 Manchester にいる間に、その後発表された Moseley, Frank Hertz の実験等、新しい発見についての解釈を加えた前論文の延長とも言うべき論文を 1915 年 8 月に発表している。

“On the Quantum Theory of Radiation and the Structure of the Atom,” *Phil. Mag.*, vi, **30**, 394 415 (1915)

Bohr の理論の発展には理論家と実験家の協力が必要であった。高嶺俊夫 (後に理化学研究所主任研究員: 1885 ~ 1959) は 1909 年東京帝国大学物理学科を卒業し、長岡半太郎教授の許で分光光学の研究をしていた。彼は 1915 年 2 月より 1918 年 9 月まで京都帝国大学物理学教室で助教授として吉田卯三郎講師 (後教授: 1887 ~ 1948) とともに Dr. Lo Surdo 法による有名な Stark 効果の研究をし、その卓抜な分光光学に関する豊富な学識は広く海外に知られていた。京都帝国大学を辞して後、当時新設された理化学研究所に入所したが、直ちに欧米各国での分光光学研究の途についた。米国各地を経て 1920 年春 Copenhagen に至り、開設間もない Bohr の研究所で Bohr の要請により若いデンマークの研究者に分光光学の技術を教えることになって、約 1 年間そこに滞在した。高嶺の没後に友人、門下生が思い出の記を編集したとき Bohr は往時

の高嶺の協力に対して追憶の記を寄せ、その中に次のように記されている。

“After many fruitful spectroscopic researches in Japan and various laboratories abroad, Toshio Takamine came to work with us in Copenhagen in 1920, shortly after the creation of our institute designed for the promotion of intimate cooperation between experimentally and theoretically working physicists. Our group was at that time still small, and with his wide experience in spectroscopy, Takamine’s participation in the work proved most valuable. The study of the effect of electric and magnetic fields on spectral lines had in those years required great interest as a consequence of the development of the quantum theory of atomic constitution. In this connection, the investigation which Takamine, together with the Danish physicists, H. M. Hansen and W. Werner, performed on the Zeeman and Stark effect in the mercury spectrum brought much new information for the testing and elucidation of the theoretical view points.”²⁾

また Bohr の水素模型のとき電子の速度が速く光速度に対し無視できないので、その特殊相対論的質量変化を考慮に入れて、水素スペクトル線の微細構造を明らかにする理論が 1915 年の年末に München 大学の Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868 ~ 1951) から提出され、新しい量子数が導入された。また「微細構造定数 $\alpha = 2\pi e^2/hc$ 」という無次元定数が導かれ、その後の物理学上重大なものとなった。

Bohr の水素原子模型の理論を出発点として、新しい実験事実と理論が次々と出され、Copenhagen の彼の研究所を中心として量子力学へと発展してきたのである。

A. Sommerfeld : “Zur Theorie der Balmerischen Serie,” Sitzb. d. K. B. Akad. d. Wiss. zu München, *Math. phys. Klasse*, 425 458 (1915)

A. Sommerfeld : “Die Feinstruktur der Wasserstoff und Wasserstoff ähnlichen Linien,” *ibid.*, 459 500.

A. Sommerfeld : “Zur Quantentheorie der Spektrolinien,” *Ann. d. Phys.*, vi, 51, 125 167 (1916)

Niels Bohr は「原子の構造及びその出す放射線に関する研究への貢献に対して」1922 年 Nobel 物理学賞を授与された。

【編集委員会注】

- 1) Barkla (1877 ~ 1944) は Cambridge 大学にて J. Thomson の指導下に、X 線の細い線束が物質を透過するときを生じる 2 次 X 線の研究を始めた。その後、Liverpool 大学に移り、1903 ~ 1909 年の間、実験によりいくつもの重要な現象を発見した。そのうちの 1 つが元素の特性 X 線の発見であり、この業績により Barkla は 1914 年にノーベル物理学賞を授与された。この文の Barkla 放射とは、その特性 X 線を指していると思われる（くわしくは「放射能研究の初期の歴史」pp.83 86）。
- 2) 「日本や諸外国の多くの研究室ですばらしい分光学上の研究を行った後に、高嶺俊夫は我々と一緒に仕事をするために 1920 年、コペンハーゲンにやってきた。ちょうど、実験物理学者と理論物理学者が緊密な協力関係をもちながら研究を進めようとして設立された我々の研究所が完成した直後のことだった。当時の我々のグループはまだ小さく、分光学における幅広い経験を携えて高嶺が研究に参画したことは非常に得難いことであった。原子構造の量子論的發展の結果として、電場や磁場がスペクトル線に及ぼす効果に関する研究は当時、大きな興味をかき立てた。この関連で言えば、高嶺がデンマーク人物理学者、H. M. Hansen や W. Werner とともに水銀のスペクトルにおけるゼーマン・シュターク効果に関して行った研究は理論的見解を試し、評価するための多くの新しい情報を提供したのである。」

放射線・Ri塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 7 †

☞ Fajans Soddy 放射性元素の変位法則； Soddy による isotope (同位元素) 概念の確立 (1913年)

清水 榮



Fajans Soddy 放射性元素の変位法則；Soddy による isotope (同位元素) 概念の確立(1913年)

19世紀の末より20世紀初頭にかけて放射性気体 (emanation, Rn や $Tn = {}^{220}\text{Rn}$) あるいは Ac の発見があった。1905年には Otto Hahn によって RdTh^1 が発見された。1904年に Friedrich Oskar Giesel (1852~1927) によって、1905年には Tadeusz Goldlewski (1879~1921) によって、独立に AcX^2 が発見された。また Ac と AcX の中間生成物に RdAc^3 の存在することが1905年 O. Hahn により見出された。一方、同じ年に Chicago 大学の Herbert Newby McCoy (1870~1945) と William Horace Ross (1875~1947) は RdTh と Th とが、またアメリカの Bertran Borden Boltwood (後に Yale 大学教授：1870~1927) は Th と Io^4 が化学的に分離ができないことを知った。

† 「放射能研究の初期の歴史」は清水榮氏の遺作で、本誌ではそのうちのいくつかを選んで9回にわたって連載しています。本書全体の概要及び全目次については連載第1回の本年4月号をご覧ください。

その後、ウラニウム系列 [($4N+2$) 系列]、アクチニウム系列 [($4N+3$) 系列]、トリウム系列 [($4N+0$) 系列] に属する中間放射性生成元素が多く研究者によって次々発見された。

1910年ごろより、Soddy やドイツの Karlsruhe で研究中のポーランド生まれのアメリカの物理化学者 Kasimir Fajans (後に Michigan 大学教授：1887~1975) は、これら放射性元素のうち、互いに化学的にあるいは分光分析的に全く分離できない、化学的に同じ性質を有するものがいくつか存在することを発見していった。これは稀土類元素が化学的に分離が極めて困難であるが、Moseley による X 線分光学的には分離が可能で、周期律表の上で違う位置を占めているのとは全く異なる事実であった。Soddy はこうした放射性元素について α 粒子放出崩壊によって生成されるものは親元素より周期律系の上で2つ下の族に属し、原子量は4だけ少ないことに注目した。当時彼は Glasgow 大学の物理化学 (放射能を含む) の lecturer の職にあったが、彼の許にいた Alexander Fleck (後に英国 ICI 社会長：1889~1968) に徹底的にこう

した自然の放射性元素，特に β 崩壊をする元素について詳しく研究することを命じた。彼は Th から UX1, RdAc が，鉛から $\text{ThB}^{5)}$, $\text{AcB}^{6)}$ が，Ac から $\text{MsTh}_2^{7)}$ が，Bi から $\text{RaE}^{8)}$ が，Po から $\text{RaF}^{9)}$ が化学的に分離不可能であることを立証した。一方，同じく Glasgow にいたスコットランドの化学者 Alexander Smith Russell (1888 ~ 1972) は β 崩壊生成物は周期律系における族が，その親元素より 1 つ大きい族の元素に対応していることを発見した。

これと独立に Fajans も各放射能系列に属する放射性元素の系列関係を研究した。彼は α 崩壊により生成する元素に続いて 2 回 β 崩壊すると生成される元素は，始めに α 崩壊をした親元素と全く同じ族に属するものである，ただし原子量が 4 だけ少ないものになることを指摘した。これは 1912 年 12 月に論文を *Phys. Zeits.* に投稿して，翌 1913 年 3 月に印刷発表された。これとほとんど同時に Soddy も同じ現象を知ったのである。すなわち α 崩壊により，周期律表の上で 2 つ下の位置に来て，原子量は 4 だけ少なくなる。 β 崩壊の時は 1 つだけ右の位置に来るが，原子量の変化は見られない。これは Fajans Soddy の放射性崩壊の変位法則と呼ばれている。このころ Soddy が Fajans に激しく反発している。Fajans は α 粒子や β 粒子の放出により生成される元素の族が変化すること，すなわち化学的性質が変化することを，普通の原子価の電気化学的变化と同じようなものとして，放射能崩壊を原子構造の範囲で起こると考えた。これに対して Soddy は放射能崩壊は原子構造の中心 (inner region of structure) にある核 (nucleus) に起因することを強調している。すなわち彼は α 粒子 (He イオン) や β 粒子 (電子) の放出は核より出てくるものと考えた。以上の研究の経過を示す主な論文には以下のようなものがある。

A. van den Brock : “Die Radioelemente, das

periodische System und die Konstitution der Atome,” *Phys. Zeits.*, **14**, 32 42 (1913)

A. Fleck : “The Chemical Nature of Uranium X, Radio-Actinium, and Thorium B,” *Chem. News*, **106**, 128 (1912)

K. Fajans : “Über eine Beziehung zwischen der Art einer radioaktiven Umwandlung und dem electrochemischen Verhalten der betreffenden Radioelemente,” *Phys. Zeits.*, **14**, 131 136 (1913)

K. Fajans : “Die Stellung der Radioelemente in periodischen System,” *ibid.*, **14**, 136 142 (1913)

A. Frick : “The chemical nature of some radioactive disintegration products,” *Proc. Chem. Soc.*, **29**, 7 (1913)

A. S. Russell : “THE PERIODIC SYSTEM AND THE RADIO-ELEMENTS,” *Chem. News*, **107**, 49 52 (1913)

F. Soddy : “THE RADIO-ELEMENTS AND THE PERIODIC LAW,” *Chem. News*, **107**, 97 99 (1913)

F. Soddy : “The Radio-elements and the Periodic Law,” *Nature*, **91**, 57 58 (1913)

A. van den Brock : “Inter-atomic Charge,” *Nature*, **92**, 372 373 (1913)

以上述べた諸氏の研究で天然の放射性元素の中には原子量は異なるが化学的性質が全く同一な周期律表の上で同じ位置に来る元素の存在が明確になった。これに対して Soddy が isotope (同位元素) という名称を初めて提唱した。これは 1913 年 12 月 4 日号の *Nature* に発表された。

F. Soddy : “Intra-atomic Charge,” *Nature*, **92**, 399 400(1913).

この表題は彼が Fajans の説につよく反対していることを強調しているかのごとく思える。この論文の中で彼は上に述べたように繰り返し Fajans の考え方に相当手厳しく反論して、同位元素の存在に対して A. Fleck の研究と彼が実証した事実を 2, 3 述べて、こうしたことによるところが大きいことを言っている。

Soddy は isotope についての定義をこの論文の中で次のように述べている。

“The same algebraic sum of the positive and negative charges in the nucleus, when arithmetical sum is different, gives what I call ‘isotopes’ or ‘isotopic elements’, because they occupy the same place in the periodic table.”¹⁰⁾

当時は原子は Rutherford や Moseley の研究により原子番号 Z だけ正電荷を有する核と周囲に Z 個の電子が取り巻いていると考えられていた。核は電子と陽子より成り立っていると考えられていた。すなわち核には原子量にほぼ相当する数の陽子と Z 個の電子があると考えられていたことを思うと、当時 Soddy がこのように isotope を定義したのは頷ける。iso というのは同じという意味でギリシャ語 *ισοζ* より来たもので、tope というのは位置という意味でギリシャ語 *τοποζ* より来たものである。これを同位元素と日本語に訳したのは、第一次大戦後 Oxford の教授になっていた Soddy のところに留学して帰国し、理化学研究所所員で東京帝国大学の講師をしていた飯盛里安 (1885 ~ 1982) が 1921 年ごろ、東京帝国大学化学教室の集読会で提案したのである。同位元素は同位体と言うこともある。

なお、Soddy は上記の isotope の定義に続いて、次のように述べている。

“They are chemically identical, and save only as regards the relatively few physical properties which depend upon atomic mass directly, physically identical also. Unit changes of this nuclear charge, so reckoned algebraically, give the succes-

sive places in the periodic table. For any ‘one place,’ or any one nuclear charge, more than one number of electrons in the outerring system may exist, and in such a case the element exhibits variable valency, concern only the ring and its external environment. There is no in-and out-going of electrons between ring and nucleus.”¹¹⁾

この文章でも、彼の論文の少し前に Fajans が 1913 年の初めに *Phys. Zeits.* に発表した 2 篇の相当な力作である仕事に対する彼の反発心を窺うことができる。

1920 年ごろまでに天然の 3 つの放射能系列に属する放射性中間生成物も大体わかって、これらについて同位元素は ${}_{81}\text{Tl}$ に 3 つ、 ${}_{82}\text{Pb}$ は各系列の最終元素で放射性でないものを含めて 7 種の同位元素が見いだされた。Soddy は Pb の同位元素について、1914 年に Ceylon より thorianite という含鉛鉱物の鉛を抽出して、この原子量¹²⁾が普通の鉛とかなり異なることを見いだしている。 ${}_{83}\text{Bi}$ に 4 つ、 ${}_{84}\text{Po}$ に 7 つ、 ${}_{86}\text{Rn}$ に 3 つ (いずれも不活性放射性気体)、 ${}_{88}\text{Ra}$ に 4 つ、 ${}_{89}\text{Ac}$ に 2 つ、 ${}_{90}\text{Th}$ に 6 つ、 ${}_{91}\text{Pa}$ に 3 つ、 ${}_{92}\text{U}$ に 3 つの同位元素が知られている。

なお、Soddy の ‘isotope’ という術語に関しては、彼が 79 歳で 1956 年 9 月 22 日に死去した翌月の *Nature* **178**, 893 (Oct. 27, 1956) に Glasgow 時代の門下の Baron Alexander Fleck が追悼記事を書いている中で、彼の第 3 の大きな仕事は isotope の概念の発展に寄与したことでありと書き、 α , β 放射による変位法則によって isotope の存在が明確になったが、以下のような興味あるエピソードが出ている。

“From this also came the introduction into our language of the word ‘isotope’. It was suggested by Dr. Margaret Todd, arising from discussion that Soddy had in the house of his father-in-law, Sir George Beilby, in Glasgow.”¹³⁾

Sir George Thomas Beilby(有名な化学工業の事業者: 1850~1924)は Soddy の義父である。Isotopes の 50 周年記念の記事が London の Chemical Society の *Proc. Chem. Soc.*, November 1963 (pp.325-331) に出ているが、この中でも A. Fleck は isotopes という語は Soddy 夫妻の友人であった医学者 Dr. Margaret Todd によるものであるとはっきり書いている。

その後、Glasgow 大学の Clinical Physics の名誉教授 Dr. John Lenihan より教えていただいたところによると、Dr. Todd はドイツ各地の大学で医学を勉強した人で、ペンネーム Graham Travers といい小説等の作家でもあった。日曜日の夜に Sir George Thomas Beilby 邸で非公式の晩餐会の席上 Soddy がたまたま 'the same place' という言葉の意味を問い質したところ、その席にいた Dr. Todd が 'isotope' という言葉を提出してくれた。

この事実は 1951 年 6 月 14 日の夜 Soddy が "Science Survey" というラジオ放送をした時にも言及している。この時の下書きが Glasgow 大学の化学教室の歴史的資料のなかに残っている。それによると 'isotope' という言葉を造ったのが Dr. Todd であることは確かである。Soddy はこれを採用して 1913 年 12 月 3 日号の *Nature* の論文にこの術語を正式に提唱したのである。

Soddy は Rutherford に比べて非常に多くの本を著しているし、1904 年より 1920 年にかけて London の Chemical Society に毎年放射能に関してまとめた、その年この方面の進歩について驚くほど多くの論文を挙げた報告を出している。これは Thaddeus J. Trenn の編集で "Radioactivity and Atomic Theory" という 1 冊の本になって 1975 年に London の Taylor & Francis 社より出版されている。これを見ればこの間における斯界の研究の発展と多くの人々の業績がよくわかる。

F. Soddy は イングランド Sussex 州の Eastbourne の名家に 4 人兄弟の末子として 1877 年 9 月に生まれた。生後 1 年 4 か月の折、母が亡くなり、父はその折 57 歳であったが 2, 3 年後に耳が聴こえなくなり、25 歳になる姉が家計をみた。彼の家は敬虔で厳格な Calvinist で、このことが彼の一生を通じて彼の人格に強く影響している。

1898 年 Merton College の化学を優等で卒業して、Oxford に来て化学を学ぶことになった。ここで最終試験に外部よりの試験官として来ていた William Ramsay の認めるところとなり、Ramsay の許に少しいたが、1900 年 5 月にカナダの Toronto に空いたポストに応募してカナダに渡った。これは不成功に終わったが、たまたま Montreal の McGill 大学に新しく赴任してきた物理の教授 Rutherford のところで化学の助手を探しているのに応じて、これより 2 年 3 か月 Rutherford とともに Th, Tn の研究より始めて、放射能の本性を解明する有名な仕事をした。この間 Rutherford と共著の 9 篇の論文を著し、1903 年 3 月 London の Ramsay の研究室に帰ってきた。この年の 7 月には早くも Ramsay と共著で Ra が α 粒子を放出すると He が生ずることを確かめた実験の論文を出した。

F. Soddy は、その翌年 1904 年より 1914 年まで Glasgow の大学の物理化学の Lecturer となって放射能に関する研究を続け、放射化学という新しい分野を開拓したが、彼の待遇はよくなく、彼の Calvinist としての狷介な性格は大学内で同僚より好まれなかった。しかし、この間に放射性元素の変位法則、同位元素概念の確立等々、輝かしい業績をあげた。

Soddy は 1914 年にスコットランドの Aberdeen 大学の化学の教授となり、1919 年に Oxford 大学の Dr. Lee's Professor of Chemistry になって Oxford に帰ってきたが、同僚よりその Calvinist としての気難しい性格が敬遠され、家庭的にも子供がなく、世の中と isolate したよ

うなところがあり、彼が大学で計画したことも実現せず、1936年に夫人が亡くなって間もなく、59歳の若さでOxfordを辞した。Oxfordにいた17年間に計画していた放射化学の研究室も完成しなかった。

彼は、化学の教育の改善と哲学や、また神学の方に興味を向けていった。Oxfordを辞職してから1956年まで20年間独身で過ごし、淋しい生涯であったようである。専ら著述や科学者の社会的責任などについて講演している。

F. SoddyはOxford時代、1921年に「放射性物質の化学の知識に貢献したことおよび同位元素の起源とその本性に関する研究」に対してNobel化学賞を授与されたが、これは同じ年に物理学賞を授与されたA. Einsteinとともに、それまでの彼等の輝かしい業績を考えると遅きに失したと言わなければならない。Soddyの場合はCalvinistとしての厳しい性格と、家庭的に子がなく、孤独の影が彼につきまとっていたことが、そして同僚より必ずしも好意的に遇されなかったのが一因を成しているように思える。彼の伝記的書物や論文は数多いが、1963年11月号の同位元素50年記念の*Proc. Chem. Soc.* pp.325-331と、彼のことを書いた極めて興味ある次の論文を挙げておく。

Mansel Davis: "Frederick Soddy: The Scientist as Prophet," *Ann. Sci.*, **49**, 351-367 (1992)

また、彼自身の手により彼の研究の歴史は1921年のNobel賞受賞講演Les Pris Nobel, 1921またはNobel Lectures, Chemistry 1901~1921(Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 1966)のpp. 365~399に要領よくまとめられている。

【編集委員会注】

- 1) 原文は「RaTh」となっているが、これは「RdTh」(ラジオトリウム, ^{238}Th)のことであろう。
- 2) アクチニウム X, ^{223}Ra
- 3) ラジオアクチニウム, ^{227}Th
- 4) イオニウム, ^{230}Th
- 5) トリウム B, ^{212}Pb
- 6) アクチニウム B, ^{211}Pb
- 7) メソトリウム 2, ^{228}Ac
- 8) ラジウム E, ^{210}Bi
- 9) 原文は「Ac」となっているが、AcA (^{215}Po)あるいはAcC (^{211}Po)の半減期は非常に短いことから、「化学的に分離不可能であること」を示すことは困難と考えるのが妥当であり、これは「RaF」(ラジウム F, ^{210}Po)のことであろう。
- 10) [訳]原子核の中の正電荷と負電荷の代数和(プラス、マイナスを考慮に入れた合計)が等しく、算術和(プラスの合計)が異なるものを「同位体」または「同位元素」とよぶ。これらは周期表の上で同じ位置を占めるからである。
- 11) [訳]これらは化学的に等しく、また原子質量に直接依存する比較的少数の物理学的性質を除いては、物理学的にも同一である。代数的に数えて、この原子核の電荷が1単位変化するとき、周期表の上では1つ隣の位置に移る。どの1つの位置、すなわち1つの核電荷に対しても外環系には1個以上の電子が存在しうる。そしてこのような場合、元素は外環ならびに外部環境のみに関連して、異なる原子価を示す。外環と原子核の間には電子の出入りはない。
- 12) ここでは質量数のこと。
- 13) [訳]これから、「同位元素」という用語が導入された。この用語は、ソディが彼の義父(ジョージ・ピールビー卿)の家で行ったディスカッションの中でマーガレット・トッド博士により示唆された。

放射線・Ri塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 8[†]

自由電子による輻射線(X線, γ 線)の散乱に関する Klein 仁科の公式(1928年); 仁科芳雄の活動

清水 榮



自由電子による輻射線(X線, γ 線)の散乱に関する Klein 仁科の公式(1928年); 仁科芳雄の活動

Klein 仁科の公式は、仁科芳雄(1890~1951)が Copenhagen の Niels Bohr の理論物理学研究所に留学した最後の年にした重要な研究成果であるが、この当時の研究所についてここに少々触れておく。

Niels Bohr は 1911 年 Cambridge の Cavendish Laboratory に留学したが、数か月後に Manchester の E. Rutherford の元に到り、1912 年 3 月より 7 月まで滞在し、原子構造に関する彼の理論的研究を進め、帰国後の翌 1913 年 7 月に有名な原子構造の理論を発表した(“Niels Bohr の原子構造論(1913年)”の項参照)。この頃彼は Copenhagen 大学の Martin Knudsen 教授(真空技術の研究で有名: 1871~1949)の助手兼

Privatdozent²のような低い地位にいた。デンマーク政府に対し理論物理学の教授職を設けるよう要請したが実現せず、彼の才能を高く評価した E. Rutherford が 2 年間 Manchester に来て研究が続けられるように講師の籍を提供してくれたため、1914 年 10 月に Manchester に戻った。2 年後にやっと Copenhagen に理論物理学の教授籍が新設されたので、Bohr は 1916 年の初夏に帰国してこの地位に就いた。当初は秘書 1 名、機械工 1 名のささやかな研究室であったが、この年の秋にオランダより Hendrik Antonie Kramers (1894~1952) が来て、Bohr の最初の協力者として量子力学の建設、発展に尽力することになった。1918 年にはスウェーデンより Oskar Benjamin Klein (1894~1977) が、1920 年 6 月には Manchester 時代の友人ハンガリー人の George de Hevesy がやって来た。こうした優秀な研究者が Bohr の研究室の中核となって、漸次各国より若い優れた人材が集まって来た。Manchester の E. Rutherford と München の A. J. W. Sommerfeld がデンマーク政府に Bohr のために理論物理学研究所を設立することを要望して、Carlsberg Foundation の資金でこ

[†]「放射能研究の初期の歴史」は清水榮氏の遺作で、本誌ではそのうちのいくつかを選んで 9 回にわたって連載しています。本書全体の概要及び目次については連載第 1 回の本年 4 月号をご覧ください。

れが完成し、1921年3月に開所された。Bohrは終生この所長であった。この研究所には量子力学の創世期、さらにその発展に貢献した人々が、留学あるいは短期間訪問して研究し、また討論のコロキウムに参加して、20世紀の新しい物理学発展のメッカになった。

1923年1月にはHevesyはH. G. J. Moseleyの法則³⁾に基づいてX線分光分析法の手段によりオランダ出身のDirk Coster(後にGroningen大学の物理学教授:1889~1950)と協力して原子番号72の新しい元素hafnium(Hf)を発見した。仁科芳雄がBohrの元に来たのはこの発見の直後で、理論物理学研究所の開所2年目の1923年4月である。研究所が活気を呈し始めた頃であった。

仁科芳雄は1890年12月、岡山県の笠岡市に近い里庄の旧家に生れた。地元の小学校、岡山中学校、第六高等学校を経て、東京帝国大学工科大学電気工学科に進学し、1918年7月首席で卒業、さらに大学院(工科)に進み、物理学、数学の講義を聴いた。また設立して間もない理化学研究所(理研)の研究生として鯨井恒太郎(1884~1935)の研究室に入ったが、長岡半太郎の研究室で物理の実験をした。大学院に2年在学した後1920年8月、理研の研究員補に任命され、欧米諸国への留学を命ぜられて、1921年5月に東京を立ち、同年10月より1922年8月までCambridgeのCavendish LaboratoryのRutherfordの元で初めて本格的な物理学実験を行う機会を得た。尖針計数管⁴⁾の研究をし、これを用いてX線のCompton散乱のときの反跳電子の方向分布を調べる実験などを行っている。1922年の秋にドイツに渡り、11月より翌年3月までGöttingen大学で物理のMax Born教授(1954年Nobel物理学賞受賞:1882~1970)や数学のDavid Hilbert教授(1862~1943)の講義を聴講する。その後1923年4月にCopenhagenに到って、Bohrの門下に入り、1928年11月まで5年半ほどここに留まり、各国よりやって来た研究者とともに有名なコロキウムに出席

し、当時発達してきた量子力学への理解を深めた。

最初はHevesyの元でCosterとともにX線分光分析に関する実験に従事していたが、1926年にHevesyがドイツのFreiburgの物理化学の教授として去る頃より、理論物理学へと転じ、新興の量子力学関係の研究に没入することになった。1927年までの間にX線分光分析の研究について5篇の論文を発表しているが、この間、日本よりCopenhagenに留学した青山新一(後に東北大学教授:1882~1959)、木村健二郎(後に東京大学教授:1896~1988)にX線分光分析の手法を教え、1927年に3人の共著で発表したX線吸収スペクトルの化学結合による依存性に関する論文も含まれている。

仁科は1927年の8~10月にParisに遊学した後、11月上旬より翌1928年2月下旬までHamburgに赴き、Wolfgang Pauli(1945年Nobel物理学賞受賞、後にZürichのETHの教授:1900~1958)の講義を聴く傍ら当時そこに留学していたIsidor Isaac Rabi(1944年Nobel物理学賞受賞、米国に帰国後Columbia大学教授:1898~1988)と協力して量子力学によるX線吸収常数に関する仕事をした。

その後Copenhagenに戻り、1928年の春Hamburg大学よりたまたまCopenhagenに来ていたWalter Gordon(1893~1940)、O. B. Kleinと3人で話し合う機会があった。Compton効果についてはこの両者はすでに研究したことがあったが、前年1927年に発表されたP. A. M. Diracの新しい相対論的量子力学を使ってCompton効果はいかに表現されるだろうかという話題がきっかけになって、仁科はKleinと一緒にこの問題に取り組むことになった。その夏Klein一家はFuenen島のある田舎町で休暇をとることになったので、仁科もそこでKleinと一緒に仕事をして、複雑な計算の結果1928年10月の末に*Zeits. f. Phys.*に2篇の論文を投稿した。その1つが有名なKlein 仁科の式となった。

O. Klein und Y. Nishina : “Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac,” *Zeits. f. Phys.*, **52**, 853 868 (1929)

この Klein 仁科の式の論文の他に Compton 散乱線の偏極に関する論文も投稿している。

Y. Nishina : “Die Polarisation der Comptonstreuung nach der Diracschen Theorie des Elektrons,” *Zeits. f. Phys.*, **52**, 869 877 (1929)

この2篇の論文は、いずれも1928年10月30日に受理されている。仁科はこの2篇の論文を提出した直後の10月末に Copenhagen を去り、Paris, London を経由して10月31日に欧州を離れ、米国各地の研究者を訪問したのち、12月21日に帰国している。上記の2篇の論文が掲載された *Zeits. f. Phys.* を見たのは帰国後のことであった。

Klein 仁科の式は実験によく合うので、Dirac の電子に関する相対論的量子力学の正当性を初めて示したものとして学界で高い評価を得た。なお Copenhagenに残った O.Klein は1931年に Stockholm の教授になってスウェーデンに帰った。

仁科は帰国して理研の長岡研究室に戻り、量子力学とその応用という課題を掲げた。彼は欧州滞在中 N. Bohr の元で量子力学を建設した人々との交流を通じて得た新興の物理学について、東京はもとより京都帝国大学、北海道帝国大学においても集中講義をして、我が国の学界に新風を吹きこんだ。1931年7月には仁科研究室が創設され、優秀な若い研究者がその傘下に集まってきた。

また、仁科の帰国した翌年1929年9月には、量子力学の建設者 W. Heisenberg (当時28歳) と P. A. M. Dirac (当時27歳) を米国よりの帰途日本に招聘し、理研と東大で講演してもらったが、仁科はこの両碩学の業績を紹介し、講演を解説して、全国より来聴にきた若い研究者に

多大の影響を与えた。1931年3~4月には Copenhagen の N. Bohr の研究所に留学した当初の3年間その指導下で X 線分光分析について研究した恩師であった G. de Hevesy 夫妻が来日した折にも、仁科は各地で講演会を催し、その業績を紹介、解説して我が国各方面の研究者を鼓舞した。1935年4月に P. A. M. Dirac が再び来日した折にも、仁科は各地でこの碩学の講演会を催し、学界に裨益するところが多かった。1937年4月には、恩師 N. Bohr 夫妻を招聘することができ、彼の元に留学した人々によって温かく歓迎されたが、Bohr 自身は僅か1か月の滞在中に仁科の案内で理研、東大、京大、阪大等で十数回の講演をした。量子力学の基本的概念、思考を分かりやすく解説して、各地で物理学徒のみならず、哲学、生物学等広い方面の研究者に新興の量子力学をめぐる諸問題について、その指導者より直接に聴き、討議する機会が与えられ、我が国の学界に多大の影響を与えた。こうした西欧物理学界の碩学を招き、我が国の若い研究者を鼓舞した仁科の功績は忘れられてはならない。

こうして仁科のもたらした新鮮な活気のうちに優秀な若い研究者が次々と集まってきて、理論、実験の両方面に仁科研究室は大きく発展していった。理論方面では京都より朝永振一郎 (1965年度 Nobel 物理学賞受賞、後に東京文理科大学の教授、学長：1906~1979) をはじめ、玉木英彦 (後に東京大学教授：1909~)、坂田昌一 (後に名古屋大学教授：1911~1970)、小林稔 (後に京都大学教授：1908~2001) らの人々が仁科の元に集まり、活発に研究が展開された。一方、実験方面では嵯峨根遼吉 (東京大学教授：1905~1969)、矢崎為一 (1902~1970)、杉本朝雄 (1911~1966)、山崎文男 (1907~1981)、竹内桓 (1911~2001) 以下多くの新進学徒が門下に集まり、原子核、宇宙線に関する本格的な実験が行われるようになった。1937年4月には我が国最初のサイクロトロン (磁極径26インチ) が完成し、原子核物

理学のみならず、放射線生物学の研究にもこれが利用された⁵⁾。仁科はこのサイクロトロン⁵⁾の完成直後、より大きな60インチ磁極径のサイクロトロンの建設を計画し、1943年に完成させた。宇宙線の観測は仁科研究室が我が国で初めて行った研究で、大型のWilson霧函をはじめ、計数管等の測定装置を整備し、多くの成果を挙げているが、中でも1937年8月には宇宙線の間接子の質量を測定するなど注目すべき研究を発表している。

Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya: "On the Nature of Cosmic Ray Particles," *Phys. Rev.*, **52**, 1198-1199 (1937).

Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya: "On the Mass of the Mesotron," *Phys. Rev.*, **54**, 585-586 (1939).

このように、仁科研究室は原子核、放射能、宇宙線の各方面にわたって多くの成果を挙げてきた。ここではそれらについて個々に述べることは割愛するが、放射能について、仁科がかつてCopenhagenのG. de Hevesyの元で協力してX線分光分析の研究を行ってきた東大の木村健二郎(前出)と10年の後再び協力して2つの新しい発見をしたことを述べるに止めておく。

小サイクロトロン(磁極径26インチ)では ${}^6\text{Li} + {}^2\text{D}$ 反応によって出る高速中性子を専ら使用し、これをウラン(U)及びトリウム(Th)に当てて生成核種を化学分析によって決定する研究をしたが、ここに次の2つの実験を記しておく。

天然のThすなわち ${}^{232}\text{Th}$ は(4n+0)系列の先祖であるが、これを高速中性子で衝撃すると(n, 2n)反応によって ${}^{231}\text{Th}$ (これは当時UYと呼ばれていた)が生成される。この核種は(4n+3)系列に属するもので、この系列に属する放射性核種としては初めて人工的に作られたものである。

Y. Nishina, T. Yazaki, K. Kimura and M. Ikawa: "Artificial Production of Uranium Y from Thorium," *Nature*, **142**, 874 (1938).

これより更に重要なことは、天然ウラン ${}^{238}\text{U}$ に高速中性子を当てて、(n, 2n)反応で半減期6.6日の β 線放出核種 ${}^{237}\text{U}$ ⁶⁾を発見したことである。

Y. Nishina, T. Yazaki, H. Ezoe, K. Kimura and M. Ikawa: "Induced β Activity of Uranium by Fast Neutrons," *Phys. Rev.*, **57**, 1182 (1940), dated May 3, 1940.

この報に接しBerkeleyのRadiation Laboratory, University of CaliforniaにあったEdwin H. McMillan(1951年Nobel化学賞受賞:1907~1991)は直ちに同所の60インチ・サイクロトロンによるBe+Dの高速中性子を使って、同じく天然ウラン ${}^{238}\text{U}$ をたたき、(n, 2n)反応で ${}^{237}\text{U}$ を得ている。発表は仁科木村グループに遅れること1か月と20日余であった。

Edwin McMillan: "The Seven Day Uranium Activity," *Phys. Rev.*, **58**, 178 (1940), dated June 28, 1940.

木村とともに化学分析に従事した井川正雄(1887~1966)は、鹿児島県知覧の帖佐という家の出身で、後に京都の井川家の養子となった。1909年に京都高等工芸学校を卒業し、4年間助教授をしてから上京し、旭硝子、東京工業大学を経て木村健二郎教授の元に来たが、化学分析の仕事を好み、分析の名人と言われた人である。後に高速中性子によるU及びThの核分裂生成物の同定に従事し、最晩年は日本検査(株)に籍をおいた。

このように理研の仁科研究室は理論、実験両方面に多数の俊英を擁して名実共に我が国における新しい物理学、放射線生物学のメッカになったが、太平洋戦争の勃発とともに研究員は動

員されたり、戦時研究に転向せざるを得ない状況に至った。戦時中は ^{235}U の熱拡散分離を試みる一方、60インチの大サイクロトロン建設に力を致し、空襲や困難な時期にこれらを完成させたが、十分活用されなかった。終戦後1945年11月に占領軍によってこれら大、小2基のサイクロトロンは破壊された。理研は1946年6月に占領軍総司令部(GHQ)によって解体を指示され、1948年3月に解散したが、後に(株)科学研究所の設立に伴い、仁科はその社長に就任し、我が国の学術の再興に全力を傾注した。彼のGHQとの交渉の非常な努力の結果、1950年4月に初めて我が国に米国より放射性同位元素が提供され、1949年1月に発足した科学技術行政協議会(STAC)内に放射性同位元素部会が設けられた。仁科はその部会長として、将来我が国においてもこれが多方面に使用されることを見通して、日本における放射性同位元素を取扱う統一団体の設立を促進したが、肝臓癌のため1951年1月10日逝去した。

彼の死後、学界の権威者及び放射性同位元素の利用者が集まって1951年5月1日に日本放射性同位元素協会が設立され、同年9月17日の第1回総会で茅誠司(1898~1988)を初代会長に選出した。1954年5月1日に社団法人に改組、1971年8月1日に「日本アイソトープ協会」と改称し、日本国内における放射性同位元素の配分、供給、廃棄物の処理を行い、また活発な学術活動を行い、今日に至っている。

仁科芳雄の生涯は61歳という短いものではあったが、我が国学術の進展に努力した数々の方面での指導的立場の活動については、ここに今更述べる余地もないほど周知のことであって、まことに価値ある輝かしい生涯であったと言うべきである。

【編集委員会注】

- 1) 本講座第6回(9月号)に掲載。
- 2) 日本では当時、「大学の私講師」と訳され、原則無給であった。
- 3) Moseleyは金属の対陰極のX線管を使用して、元素のK, L, M, Nの特性X線を認め、かつこの特性X線のスペクトル構造は種々の原子についてまったく共通であり、K線のX線分光を各種の原子番号Zの元素について行って、波数 $\nu = 1/\lambda$, ν_0 をRydberg波数とすると、振動数 $\nu_{K\alpha}/\nu_0 = (3/4) \cdot (Z - 1)^2$ なる簡単な関係を見いだした(論文発表は1913年と1914年。このとき25~26歳)。この法則の利用により、その後の1923年には ^{72}Hf が、1925年には ^{75}Re が発見されることとなった。なお、Moseleyは1914年に始まった第一次世界大戦の軍務に服し(通信将校)、翌1915年に27歳で戦死した。彼の戦死は広く世界中に伝えられ、ドイツ側でも科学界の重大な損失として天才的な若い物理学者を悼んだ。
- 4) 陽極に先の尖った針金を用いたガイガー計数管。仁科芳雄は1921年、ラザフォード教授のもとでガイガー先端計数管を用いてX線のコンプトン散乱の反跳電子についての研究を行っている。
- 5) 仁科芳雄は中性子の生物作用に関する研究等、放射線生物学の先駆的研究を行った。
- 6) ^{237}U の半減期は、現在では6.75日とされている。

【お知らせ】

この度、本誌連載の原書「放射能研究の初期の歴史」(B5判, 216頁, 2004年9月発行)を若干部数、著者のご遺族より日本アイソトープ協会に無償提供いただきました。つきましては、ご希望の方に送料実費ご負担のみにてお送りいたします。返信用封筒(A4判封筒に340円分の切手を貼付(冊子小包))を同封の上、「総務部企画課」宛お申し込みください(1冊/1人)。なお、数に限りがありますことをご承知おきください。

* 事務局注：送付は終了しています(2014年7月)

放射線・Ri塾

【連載】放射能研究の初期の歴史 9 † (最終回)

Frédéric Joliot Curie と Irène Joliot Curie 夫妻による 人工放射能の発見 (1934年)

清水 榮



Frédéric Joliot Curie と Irène Joliot Curie 夫妻による人工放射能の発見 (1934年)

Frédéric Joliot Curie (1902 ~ 1958) と Irène Joliot Curie (1897 ~ 1956) は、1932年に J. Chadwick が中性子を発見する研究の過程で、Po α 粒子衝撃により ${}^7\text{Be}$ や ${}^3\text{Li}$ より非常に高いエネルギーの γ 線が放出されると考えられた現象に際し、パラフィン、水、セロファン等によるいわゆる水素効果¹⁾を発見した。しかしこれが中性子の発見に至らず、Cavendish Laboratory で Rutherford の下にあった Chadwick に千載の功を譲った。

彼らはこの苦い経験を味わった。その後も Po α 粒子の衝撃の実験を続けて、1933年頃 ${}_{13}\text{Al}^{27}$ を照射すると ${}_{13}\text{Al}^{27} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_{15}\text{P}^{30} + {}_0\text{n}^1$ の核反応で生成された ${}_{15}\text{P}^{30}$ が最大 3.0 MeV の陽電子を放出して、2.55 min の半減期で減衰する放射性元素であることを発見した。これが人工的

放射能の発見の最初である。これは 1934年1月19日付で *Nature* 誌に投稿され、1934年2月10日の同誌に発表された。

“Artificial Production of a New Kind of Radio Element,” *Nature*, **133**, 201 (1934)

これは 1934年1月15日に Académie des Sciences に報告された。

“Un nouveau type de radioactivité,” *Compt. rend.*, **198**, 254-256 (1934)

彼等はさらに ${}_{5}\text{Be}^{10} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_7\text{N}^{13} + {}_0\text{n}^1$, ${}_{12}\text{Mg}^{24} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_{14}\text{Si}^{27} + {}_0\text{n}^1$, ${}_{13}\text{Al}^{27} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_{15}\text{P}^{30} + {}_0\text{n}^1$ で生成された ${}_7\text{N}^{13}$, ${}_{14}\text{Si}^{27}$, ${}_{15}\text{P}^{30}$ は、いずれも β^+ 放出の人工的生成の新放射性元素であることを確認した。これら一連の報告は 1934年3月20日投稿の

“I Production artificielle d’éléments radioactifs ;
II Preuve chimique de la transmutation des éléments,” *Journ. de Physique et le Radium*, **5**, 153-166 (1934)

† 「放射能研究の初期の歴史」は清水榮氏の遺作で、本誌ではそのうちのいくつかを選んで9回にわたって連載いたしました。本書をご希望の方は、本欄末尾をご覧ください。

に発表されている。

彼等は新しい人工放射性元素の研究により1935年のNobel化学賞を共同で受賞している。両者ともそれぞれNobel講演を1935年12月12日に行っている。このうちF. Joliotの講演では ${}_{13}\text{Al}^{27} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_{15}\text{P}^{30} + {}_0\text{n}^1$ でできた ${}_{15}\text{P}^{30}$ の確認のために採用した巧妙な化学的操作について報告している。

ひとたび α 粒子衝撃による人工放射性元素の生成が報じられるや、直ちに世界各国の原子核物理学の研究所で、 α 粒子以外にも中性子や加速荷電粒子による研究が活発に開始されて、新しい核物理学研究の領域が開かれた。このうち特にRomeにおいてEnrico Fermi (1901~1954)の中性子衝撃により数多くの新放射性元素がつけられ、これが後に1938年暮れのOtto Hahn (1879~1968), Lise Meitner (1878~1968)による ${}_{92}\text{U}^{235}$ の核分裂の発見に至り、原子力時代が開かれたのである。

Jean Frédéric Joliot Curieは1902年7月Parisで、商人Henri Joliotを父として生まれた。Parisの市立工業物理化学学校(École de physique et de chimie industrielle)に学び、1923年卒業して電気技師になったが、かつてPierre Curieの下で研究したSorbonneのPaul Langevin教授(1872~1946)の下で学び、その勧めで1925年にInstitut de RadiumのM. S. Curie夫人の助手になった。その翌年Curie夫人の娘Irèneと結婚した。以後、夫妻は協力して研究に打ち込み、彼は1937年College de Franceの教授になった。

J. F. Joliot Curieは第二次世界大戦中にフランス砲兵大尉としてRaの研究を行った。戦時中はナチスへの抵抗運動に参加した。1939年にはその前年発見されたUの核分裂に際し、中性子が放射されるという重要な発見をした。1942年フランス共産党に入党した。

戦後原子力庁長官、原子力委員会委員長などを務めたが、彼の共産党的見解の故に政府より

任命されたポストを退くことになった。

1948年にはフランスの研究用の第一号原子炉ZOEを建設した。平和運動に活躍して1955年にはRussel Einstein宣言に署名している。

妻Irèneが永年の放射能研究に起因する白血病で死去した²⁾2年後の1958年8月14日に同じく白血病でParisで死去した。

Irène Joliot CurieはPierreとMarie Curie夫妻の長女としてParisで1897年9月12日に生まれた。Sorbonneで母の講義を聴いて放射能の研究を志して1918年Institut de Radiumで母の助手になり、1926年、同じく助手をしていたFrédéric Joliotと結婚し、以後夫妻協力して研究を進めた。1934年Curie夫人の没後は研究所を主宰した。1936年に母の後任としてSorbonneの教授となった。その後、科学担当の国務次官などを務めたが、大戦後の1946~1951年には原子力委員会委員を務めている。

永年の放射能研究が原因となった白血病のため1956年3月17日に59歳で没した。

【編集委員会注】

- 1) パラフィン、水等の水素原子が中性子等のエネルギーを減弱する現象。
- 2) 個々のがんについて、その原因が放射線であると断定することは通常非常に困難である。

【お知らせ】

このたび、本誌連載の原書「放射能研究の初期の歴史」(B5判, 216頁, 2004年9月発行)を若干部数、著者のご遺族より日本アイソトープ協会に無償提供いただきました。ご希望の方に送料実費ご負担のみにてお送りいたします。返信用封筒(A4判封筒に340円分の切手を貼付(冊子小包))を同封の上、「総務部企画課」宛お申し込みください(1冊/1人)。なお、数に限りがありますことをご承知おください。

*事務局注：送付は終了しています(2014年7月)