RADIATION EDUCATION

放射線教育

付放射線教育フォーラム 2019 年度活動報告

2019

VOL. 23　NO. 1

放射線教育フォーラム

Radiation Education Forum

放射線教育
Radiation Education

Vol. 23　No. 1

目　次

【巻頭言】　５Ｇ導入と高周波電磁波の健康への影響　山寺 秀雄　1

==========

【解説】
Ｘ線発見から原子構造の解明へ
　ークルックス管による放電研究がもたらした現代科学の基礎ー　柴田 誠一　3

【解説】
原子をつくる：人工元素物語　工藤 博司　13

【解説】
学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用　秋吉 優史　23

【資料】
箔検電器によるクルックス管からのＸ線線量率測定マニュアル　森 千鶴夫　33

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方
編集後記　緒方 良至

発行：2020 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

果から、モーズレーは論文の最後に以下の要約を記述している。

1．アルミニウムから金までの各元素を特徴付けるのは、X 線スペクトルを支配する整数 N である。

2．この整数 N、すなわち元素の原子番号は、原子核のもつ正の電荷の単位の数と同じものである。

3．アルミニウムから金までの全元素の原子番号を、アルミニウムの N が 13 であるとして表示した。

4．原子量の順が化学的性質の順と一致しない場合を除き、原子番号の順と原子量の順は同じである。

5．既知元素は、三つを除いて 13 から 79 までの全部の数に対応している。未発見の元素が三つある。

6．X 線スペクトルにおいて、どの線の振動数も、$A\ (N-b)^2$ にほぼ比例する。ここで、A と b は定数である。

この結果により、メンデレーエフ以来、原子量の順に並べることにより組み立てられていた元素の周期系に、その配列の基礎として原子番号（原子の核電荷）が与えられた。いわば経験的に得られた周期系に明確な物理的根拠が与えられた。これにより、メンデレーエフ以来の原子量の増大順に並べるという根本原理における例外、テルルーヨ

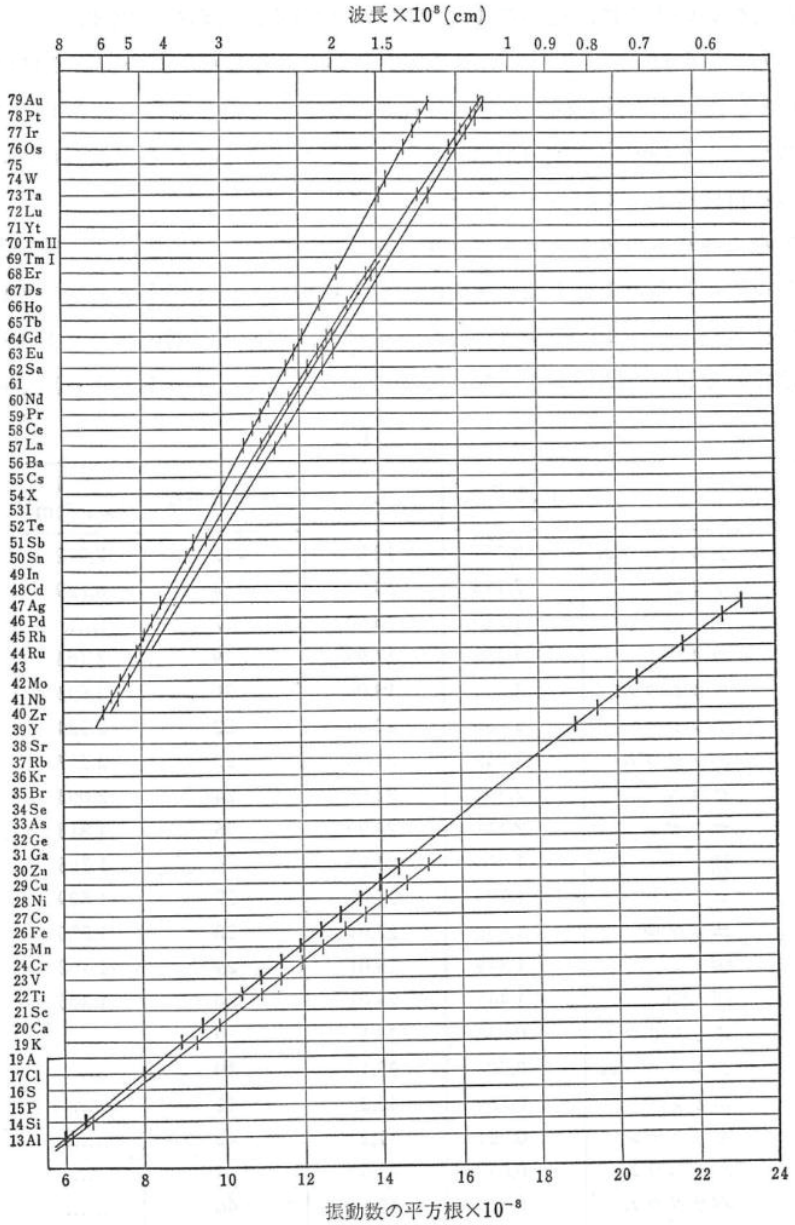


図 6. 特性 X 線の振動数と原子番号の関係 [3)]

【巻頭言】

５Ｇ導入と高周波電磁波の健康への影響

山寺秀雄

名古屋大学名誉教授

自動運転の導入が間近に迫っているが、従来の移動通信システム４Ｇでは通信速度が遅いため、低速の運転しかできない。そこで高速・大容量・低遅延の５Ｇ（第 5 世代移動通信システム）の導入が必要になる。５Ｇでは、４Ｇよりも周波数の高い電磁波が使われるので、総務省は昨年その周波数帯の割り当てを決定した。28 GHz 帯及び 3.7 GHz 帯の枠が、NTT ドコモ、KDDI、ソフトバンク、楽天モバイルに割り当てられ、各社は今春から 5G のサービスを開始する。（５Ｇ基地局が整備された地区から順にサービスが使えるようになる。）* サービスの開始にあたって、その電波の健康への影響が問題になる。（現行の）指針が守られていれば健康への影響はないという意見もあるが、心配する人々を納得させるに足る根拠が十分あるとは言えない。ベルギー・イタリアや米国の一部の地域では、５Ｇの導入を見合わせ、健康への影響を調査することになった。日本でも「市民団体　導入中止を申し入れ」「首相推進　産業推進ありき」との報道（１月２８日、中日新聞）がある。この報道とは若干異なり、総務省は「平成３０年度研究報告書　次世代電波利用システムからの電波の人体安全性評価技術に関する調査」（平成３１年３月）の中の「本調査における最終的な成果目標」の第一に「この（10 GHz 以上の準ミリ波帯・ミリ波帯の）周波数領域においては、電波防護指針では入射電力密度に基づく指針値が示されている。しかし、入射電力密度に基づく指針値は比較的遠方の電波放射源からの電波に人体がばく露される状況を想定しており、携帯電話等の人体に近接（密着）して使用する無線通信端末からの電波への人体ばく露を適切に防護できるかどうかについては明らかでない」「そこで、本研究では、準ミリ波帯およびミリ波帯の電波への人体ばく露を高精度に評価する手法を開発することを目標とする」といっている。携帯電話のほか、５Ｇ基地局の近くに住む人も電波の健康への影響が心配であろう。上記の報告書がいうように、「電波防護指針の根拠を明確化し、電波防護指針の信頼性をよ

り高める」ことが望まれる。

５Ｇに関連して一言付け加えたい。１月７日、トヨタ自動車は、自動運転や、モノやサービスがインターネットでつながる技術を駆使した次世代都市「スマートシティ」(トヨタの命名では「ウーブン・シティ」)を、静岡県裾野市の自社工場跡地に建設する構想を発表した。中国では、すでに北京郊外の雄安新区に「スマートシティ」が建設されており、ここでは自動運転の自動車が走り回り、コンビニでの買い物もホテルのチェックインも無人で行われる。欧米先進国でも以前から同様な構想はあるが、個人情報保護の観点から反対があって、実現が遅れている。５Ｇ技術の実用化においては、中国が米国を超える先進国となっており、日本はその後塵を拝している。２０世紀には日本は科学技術先進国の一つであったが、２１世紀の科学技術においては中国が先進国となった。中国のファーウェイ（華為）は競争力の高い製品やサービスを170か国以上で提供しており、もしその気になれば、世界中にあるその製品と通信網を使って、世界中の情報（その中には先端技術や軍事機密に関するものも含まれよう）を手に入れることができるであろう。このことを憂慮した米国政府は、国内でのファーウェイ製品の使用を禁止するとともに、日本を含む友好国にもこれに倣うよう促している。ファーウェイは、欧米に続き日本でも５Ｇのスマートフォンを発売するといっており、日本各社は５Ｇ関連製品の製造・販売にあたり、中国のファーウェイなど、韓国のサムスンなどとの厳しい競争を覚悟しなければならないであろう。シャープを再建した鴻海（ホンハイ）の郭会長や最近東芝の経営を引き継いだ車谷社長によれば、日本の会社は「知の死蔵」をしている。経営者の方々が自社の研究成果を生かし、他社とも連携して、世界の進歩に遅れないような経営をされることを望みたい。

＊　5Ｇの電波は直進性が高いので、多数の基地局が必要となる。2022年度には国内４社合わせ、累積７万局の５Ｇ基地局が設置されるであろうという推測もある。さらにビルなど、電波の通りにくいところでは、多数の小基地局が必要になる。

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 23, No. 1, 3 – 12 (2019)

【解説】

X 線発見から原子構造の解明へ*

ークルックス管による放電研究がもたらした現代科学の基礎ー

柴田誠一**
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
（2020 年 2 月 6 日受理）

１．はじめに

2021 年度から実施される新学習指導要領では、中学理科 2 年次の「電流とその利用」の単元で真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れることとされている。その教材としてのクルックス管からは放電現象の観察に際しX線の放出が無視できない場合がある。現在、クルックス管を安心して教育実験に活用するための安全指針の作成が進められているが、X 線の放出があまり強調されすぎると、教育現場における放電実験に関する学習意欲が委縮するのではないかと危惧される。

しかし、19 世紀後半から 20 世紀初めにかけて、真空技術の進歩に伴い実験可能になった放電現象の研究により現代科学の基礎がどのように明らかにされたかを振り返り、その解明のプロセスの一端に触れることは、子供たちの学習意欲の啓発に有効であると思う。現在、我々が当然のこととして享受している科学的基礎の多くがこれらの研究を通して明らかになった。ここでは、クルックス管による放電現象の観察から導かれた X 線の発見、そしてそれを端緒として展開された研究から原子構造の解明に至る現代科学の基本的概念が明らかにされたプロセスについて紹介する。

また 2019 年は、メンデレーエフ（D. I. Mendeleev）が元素を原子量が大きくなる順に並べていくと周期的にその化学的性質が繰り返されるという元素の周期律を発見してから 150 年になる。国際連合はこの業績にちなんで 2019 年を国際周期表年と定めた。この周期表に物理的根拠を与えたのは、放電現象から発生したX線を用いた研究であった。この原子番号の決定の研究についても紹介する。

２．X 線の発見以前

19 世紀の物理学者は「真空」の管の中の放電現象について研究してきた。気体放電の研究の初期、ファラデー（M. Faraday）は空気を薄くしていくと発光現象はきわめて起こりやすくなることを見出した（1833 年）。この放電現象の研究には、より良い真空を得ることが必要であったが、1855 年にガイスラ

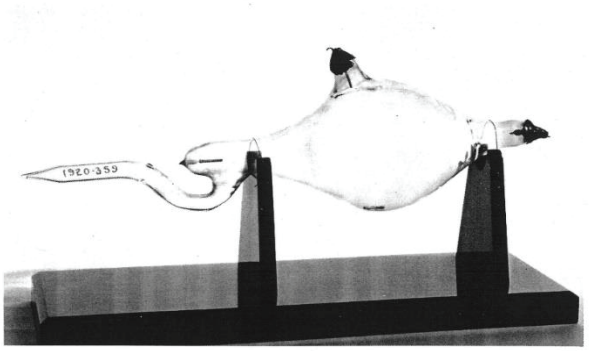


図 1．1879 年に作られたクルックス管 1)

ー(H. Geissler)により性能の良い水銀ポンプが発明され、その後の研究の進展に貢献した。1856 年、プリュッカー（J. Plücker）は、真空放電管の近くに磁石を近づけた時、放電が少し振れるのを認めた。そして、陰極付近で燐光が緑色に輝くのを見たと報告している。1869 年、ヒットルフ（J. Hittorf）は、陰極の前に置いた物体の影が映ることを観察した。これは、放電が陰極から生じていることを示していた。1876 年にゴルトシュタイン（E. Goldstein）がこの現象を「陰極線」と命名した。同じ頃、クルックス（W. Crookes）が陰極線についての系統的研究を行っている。図１[1)]に陰極線の研究のために 1879 年に作られたクルックス管を示す。当時、陰極線についてわかっていたことをまとめると次のようになる。

１．よく排気された放電管の陰極から発生している。
２．放電管の向かい側の壁にぶつかり、そこを光らせる。
３．物体の影をはっきり映す ― 直進している。
４．おそらく磁場で曲げられる。

1895 年、ペラン（J. B. Perrin）が陰極線は負の電荷をもつ粒子であることを見出した。そして、X 線発見の 2 年後の 1897 年、J. J. トムソン（J. J. Thomson）により電子が発見された。図２[1)] に、J. J. トムソンがこの研究に用いた陰極線管とその概略図を示す。1906 年、J. J. トムソンはノーベル物理学賞を受賞した。

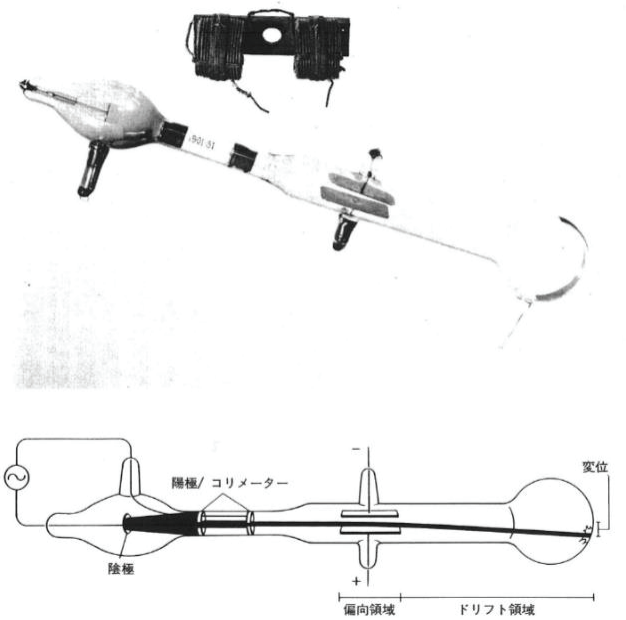


図 2. J.J.トムソンが電子の質量と電荷の比の測定に用いた陰極線管 [1)]

目に見えない陰極線粒子は、陰極（カソード）から放射される。その一部は陽極（アノード）とコリメーターのスリットを通過して、細いビームとなって進んでいく。陰極線は 2 枚の金属板の間を通過するとき、電気力を受けて曲がる。しかし、その後は力を受けず直進し、最後にガラス管の壁に衝突して、光る点をつくる。

３．X 線の発見

1895 年 11 月 8 日、レントゲン（W. C. Röntgen）はヒットルフ管を、黒い紙で覆い、光も陰極線も外に出ないようにして、部屋を完全に暗くして操作していた。そして、管から少し離れたところに置かれていた蛍光物質の白金シアン化バリウムを塗った紙が蛍光を発するのを見た。塗った面を裏側にしても蛍光の発生に変わりはなく、いろいろな物体を管とスクリーンの間に置いても蛍光は続いていた。手を置くとスクリーンにその骨が見えた。レントゲンは「新種の放射線」を見つけたことを確信し、12 月 28 日にビュルツブルグの物理・医学協会に論文を提出した。この論文の中で「新種の放射線」を、その本性についてはまだ明らかにできなかったことから、未知のものという意味を込めて、「X 線」と名付けた。

この論文はすぐに印刷され、翌 1896 年 1 月、各国に送られた。これは大変な反響を巻き起こした。その内容はすぐには信じ難いものであったが、論文に添付されていた手の X 線写真は動かしがたい証拠であった。この論文を読んだ多くの科学者が放電管を取り出し、追試を行ったが、この結果に間違いはなかった。図 3[2] に 1896 年 2 月にアメリカのニューヨークのコロンビア大学で撮られた写真を示す。手の中に入った銃弾がはっきりと映っており、これが医療に役立つことは明らかであった。この業績により、レントゲンは 1901 年、第 1 回ノーベル物理学賞を受賞している。

図 3. X 線写真 [2]

コロンビア大学のプーピン教授撮影。黒い丸は手に打ち込まれた散弾。

4．特性 X 線の発見

レントゲンによる X 線の発見の後、X 線に関して行われた研究の中で重要なものとして、バークラ（C. G. Barkla）による特性 X 線の発見があげられる。X 線が物質にあたると、二次的に X 線が発生する。バークラは 1906 年以降、この二次 X 線の性質を系統的に研究し、二次放射の X 線に 2 種類あることを発見した。一つはターゲット金属の表面で一次 X 線が単に散乱されたもので、これは入射（一次）X 線と透過力などの一般的な性質において変わりはなかった。もう一つのタイプの X 線は、均一なエネルギーをもつ放射線で、一次 X 線の性質とは関係なく、ターゲットの金属の種類によってのみ決まる特性的なものであった。ターゲット物質の化学的な状態に依存せず、各元素はそれぞれ固有の、均質な二次放射線を放出した。バークラはこれを特性 X 線と名付けた。

この当時、X 線の波長を測定する手段がまだ知られていなかったので、バークラは X 線の吸収の実験から、特性 X 線に二つの系列があることを発見し、吸収されにくい（波長がより小さい）ほうを K、吸収されやすい（波長が大きい）ほうを L と名付けた。現在の KX 線、LX 線に相当する。さらにバークラは、この特性 X 線の性質の変化を元素の原子量の変化との関連において系統的に調べている。これらの業績により、バークラは 1917 年のノーベル物理学賞を受賞している。

このバークラの研究に続いて、ラウエ（M. Laue）が結晶による X 線の回折を発見した。ラウエは 1912 年発表の論文の中で X 線の回折像の写真（ラウエの斑点と呼ばれる）を示している。この干渉現象の発見は X 線が波動としての性質をもつことと同時に結晶格子の実在を実証したことに意義がある。ラウエは、1914 年のノーベル物理学賞を受賞している。ラウエの写真は連続エネルギースペクトルをもつ X 線を用いて撮影されたが、ブラッグ父子（W. L. Bragg，W. H. Bragg）は単色エネルギーX 線（特性 X 線）が結晶構造解析に有効であることを指摘し、さらに自らが導いたブラッグ条件を利用して X 線の波長を決める試みをした。これらの研究は X 線結晶学の端緒を開いた。ブラッグ父子は、1915 年のノーベル物理学賞を受賞している。

５．元素の周期律

バークラの特性X線の発見とブラッグ父子により開発されたX線の波長測定の方法に基づいて、モーズレー（H. G. J. Moseley）の特性X線スペクトルに関する研究が行われ、原子番号が決定された。このモーズレーの研究を紹介する前に、その当時の元素の周期律に関する研究がどのような状況にあったかについて振り返ってみる。

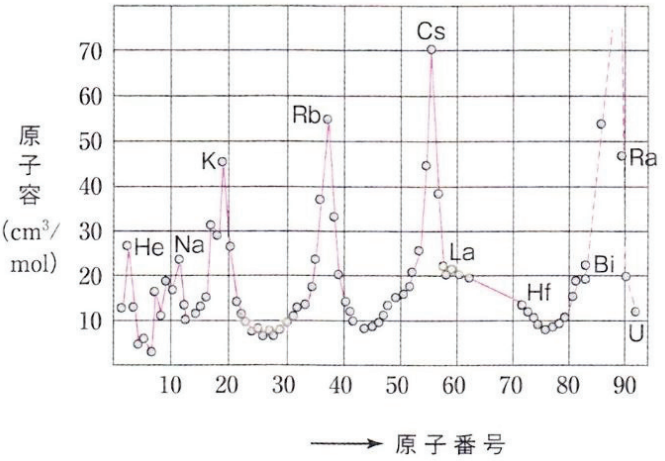


図 4. 原子容（原子量/密度）の周期性 [3)]

元素を原子量の増大順に並べたとき、化学的性質にある種の周期性が存在する（例として、原子容（原子量/密度）の周期性を図４[3)] に示す）ことは、19 世紀中に何人かの化学者によって注目されていたが、元素を周期表に配列するという最も重要な仕事は、ロシアの化学者、メンデレーエフによってなされた。

メンデレーエフは、1869 年に「元素の原子量とその性質との関係について」という論文を発表した。この中で、元素を原子量の順に並べると、元素の性質が少しずつ変わり、類似した性質の元素が周期的に現れると述べている。この元素の周期律に関する研究は、その当時まだ知られていない元素がかなりあったことから困難を極めたが、メンデレーエフは、周期表の作成にあたって表中の予想される周期性からのずれは、自然界に存在する元素の一部がまだ発見されていないことによるという大胆な仮説を立て、いくつかの空白の

			K =39	Rb= 85	Cs=133	—	—
			Ca =40	Sr= 87	Ba=137	—	—
			—	?Yt= 88?	?Di=138?	Er=178?	—
			Ti =48?	Zr= 90	Co=140?	?La=180?	Th=231
			V =51	Nb= 94	—	Ta=182	—
			Cr =52	Mo= 96	—	W=184	U=240
			Mn=55	—	—	—	—
			Fe =56	Ru=104	—	Os=195?	—
			Co =59	Rh=104	—	Ir=197	—
典型元素			Ni =59	Pd=106	—	Pt=198?	—
H=1	Li =7	Na =23	Cu =63	Ag=108	—	Au=199?	—
	Be =9.4	Mg =24	Zn =65	Cd=112	—	Hg=200	—
	B =11	Al =27.3	—	In=113	—	Tl=204	—
	C =12	Si =28	—	Sn=118	—	Pb=207	—
	N =14	P =31	As =75	Sb=122	—	Bi=208	—
	O =16	S =32	Se =78	Te=125?	—	—	—
	F =19	Cl =35.5	Br =80	J=127	—	—	—

図 5. 1871 年発表のメンデレーエフの周期表 [3)]

箇所を将来の発見によって埋められるべきものとして残しておいた。そして、その「未発見元素」に対して、周期表の左隣に位置する同族元素の名前に、サンスクリット語の“第1”と“第2”を意味する“エカ（eka）”と“ドゥビ（dvi）”を冠した名前を与えた。また、ある場合には元素の原子量の順序を逆にして、化学的性質が規則正しい周期性をもつようにした。図５[3]に、メンデレーエフにより 1871 年に発表された周期表を示す。ここでは、元素の性質は原子量の変化に対応して変化し、先行する系列と同じ規則性をもって、元素の新系列、つまり新周期となって繰り返されている。周期律は、諸元素の性質は原子量と周期的な関連性にある、と表現できる。さらに、メンデレーエフは、周期律の有用性を確実なものとするために、未知の元素の物理的および化学的性質を予言した。表１[3]に、メンデレーエフのエカ・ケイ素についての予言と、その元素が実際に発見され（ゲルマニウムと命名）観測された結果との比較を示す。メンデレーエフの予言は実際に観測されたゲルマニウムの諸性質と見事に一致した。これによりメンデレーエフの周期表の有用性が明らかになった。

表 1. メンデレーエフの予言と観測値との比較[3]

メンデレーフの予言，エカ=ケイ素(Es)（1871）	ウィンクラーの観測，ゲルマニウム(Ge)（1886年発見）
原子量は約72	原子量は72.6
EsO_2 または K_2EsF_6 から Na による還元で得られるはず。	K_2GeF_6 から Na による還元で得られた。
暗灰色の金属，融点は高く，密度は約5.5	灰色の金属，融点958°C，密度5.36
熱すると酸化物EsO_2ができ，その融点は高く，密度は4.7	酸素と反応してGeO_2になり，その融点は1,000°C，密度は4.7
硫化物 EsS_2 は水に不溶，硫化アンモンに可溶	GeS_2 は水に不溶，硫化アンモンによく溶ける

６．モーズレーの研究

モーズレーは大学卒業後、当時マンチェスター大学にいたラザフォード（E. Rutherford）の研究室に入り、ラザフォードの研究室としては初めてＸ線の研究を開始した。

1913 年から 1914 年にかけて、モーズレーは元素の周期表に含まれる全元素について、その特性Ｘ線を系統的に調べた。バークラによって明らかにされた特性Ｘ線に関する事実とブラッグ父子によって開発されたＸ線の波長測定の方法を基盤として、モーズレーの研究は進められた。モーズレーは、研究対象の試料を任意的に取り上げるのではなく系統的に取り上げて実験を行った。この研究の最も大きな成果は、原子番号が実験的に決定されうることを示し、それを原子核の正電荷数であると同定し、この電荷が元素の性質を決めることを明らかにしたことにある。

図６[3]に、モーズレーが得た結果を示す。ここには、横軸に諸元素のスペクトルから得られた振動数の平方根（$\nu^{1/2}$）が、縦軸には諸元素の N の値が、アルミニウムの N を 13 として示してある。この図から、$\nu^{1/2}$ の値が直線の上にのっていることがわかる。この結

果から、モーズレーは論文の最後に以下の要約を記述している。

1．アルミニウムから金までの各元素を特徴付けるのは、X 線スペクトルを支配する整数 N である。

2．この整数 N、すなわち元素の原子番号は、原子核のもつ正の電荷の単位の数と同じものである。

3．アルミニウムから金までの全元素の原子番号を、アルミニウムの N が 13 であるとして表示した。

4．原子量の順が化学的性質の順と一致しない場合を除き、原子番号の順と原子量の順は同じである。

5．既知元素は、三つを除いて 13 から 79 までの全部の数に対応している。未発見の元素が三つある。

6．X 線スペクトルにおいて、どの線の振動数も、$A\ (N-b)^2$ にほぼ比例する。ここで、A と b は定数である。

この結果により、メンデレーエフ以来、原子量の順に並べることにより組み立てられていた元素の周期系に、その配列の基礎として原子番号（原子の核電荷）が与えられた。いわば経験的に得られた周期系に明確な物理的根拠が与えられた。これにより、メンデレーエフ以来の原子量の増大順に並べるという根本原理における例外、テルルーヨ

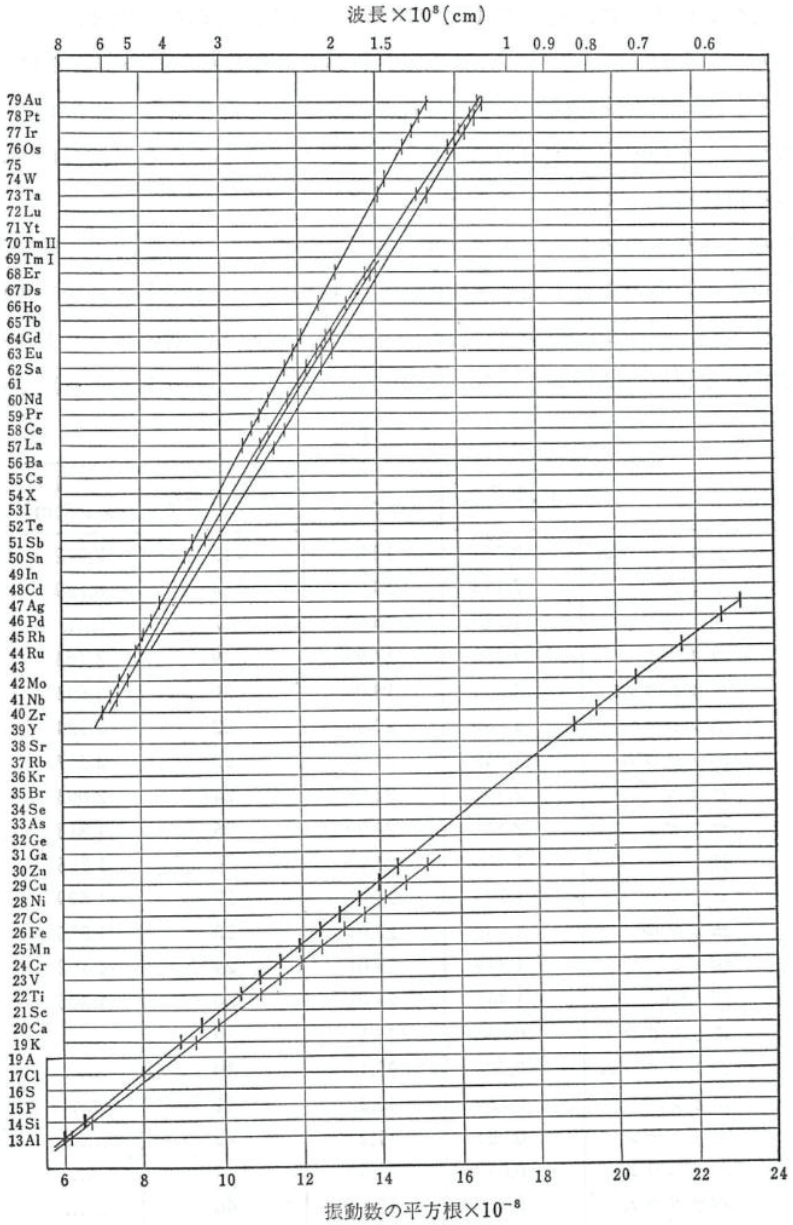


図 6. 特性 X 線の振動数と原子番号の関係 [3)]

ウ素、コバルトーニッケル、そして後のアルゴンーカリウムの 3 か所で原子量の順が逆転している、を解消できた。因みに、このとき未発見の三元素とは、原子番号 43、61、75 で、後に発見されそれぞれテクネチウム、プロメチウム、レニウムと命名されている。このうち、テクネチウムとプロメチウムは安定同位体をもたない放射性元素である。

モーズレーの特性 X 線の系統だった測定の結果、原子番号は核のもつ正電荷に相当するとの根拠が与えられたが、1920 年、チャドウィック（J. Chadwick）が実際に核電荷を測定し、その値がモーズレーの結果と一致したことによりその決定的証明を得た。

モーズレーは、この研究結果を発表した後、第 1 次世界大戦の勃発を受けて軍に志願し、1915 年 8 月ダーダネルス海峡の戦闘で戦死した。1916 年のノーベル物理学賞は受賞者なしとなっているが、モーズレーが生きていれば、この年のノーベル賞は彼に贈られていたのではないだろうか。

７．希ガスの発見

図５[3)]に示されたメンデレーエフ 1871 年発表の元素の周期表を見ると、ここにはまだ希ガスが含まれていないことがわかる。ここまで、真空放電から発生した X 線を用いてなされた研究を紹介してきたが、ここからは、低圧気体を封入した管中での気体放電の研究（希ガスの発見、原子構造の解明、同位体の発見）について紹介する。

レントゲンの X 線の発見よりおよそ 10 年前、レイリー卿（Lord Rayleigh）は主要気体密度の精密再測定の実験を開始した。そして、この研究の過程で、窒素の密度の異常という思いがけない結果を得た。レイリー卿はまず水素と酸素の密度を測ることから始め、それまでの報告値と相違ない結果を得た。ところが窒素の測定に至って、予想外の結果が得られた。当時、窒素は大気空気から酸素や二酸化炭素などの共存成分を除いてつくられていたが、レイリー卿はこのようにしてつくった窒素のほかに、窒素化合物であるアンモニアの分解による窒素試料もつくってみた。そして、当初の予想に反して、このつくり方の違いにより両者にごくわずかな密度の差が測定された。アンモニアからの窒素の密度が、大気空気からの窒素の密度より約 1/1000 軽いという結果が得られたのである。自らの実験結果に自信をもっていたレイリー卿はこのわずかな差を実験誤差として片付けることはできなかった。そこでさらにこの違いの原因について追究していったが、明確な解を得られないまま 1894 年にその状況について講演した。

その講演の聴講者の中にラムゼー（W. Ramsay）がいた。ラムゼーはこの研究結果に興味をもち、レイリー卿の了解を得て実験を開始した。ラムゼーは密度の差の原因が大気空気からの窒素にあると考え、この大気空気中の窒素を化学的に除去していって得られた気体をプリュッカー管に入れて低圧放電で発生したスペクトルを調べた。得られたスペクトル線には窒素からのもののほか既知のどの気体にも属さないものが観測された。レイリー卿もほぼ同時期に同様の結果を得た。こうして、この年（1894 年）、アルゴンと命名された希ガスが発見された。

この発見を端緒として、気体放電スペクトルの観測から、ヘリウムその他の希ガスがその後数年のうちにラムゼーにより発見され、その原子量の測定結果から元素の周期表に新しい族が加えられた。希ガスの発見の業績により 1904 年のノーベル物理学賞はレイリー卿が、同年のノーベル化学賞はラムゼーが受賞している。

８．原子構造の解明

レイリー卿が気体密度の再測定の実験に取り掛かって間もない頃（1885 年）に、バルマー（J. J. Balmer）は水素ガスを低圧で管中に封入して放電を起こさせ、可視光の領域に後に彼の名前をとってバルマー系列と呼ばれる水素の輝線スペクトルを得た（図 7[4]）。1890 年にリュードベリ（J. R. Rydberg）は、この輝線の波長（λ）を、バルマーの与えた式を書き直し、次の式で与えられることを示した。

$$1/\lambda = R\ \{(1/2^2) - (1/n^2)\} \qquad (1)$$

ここで、Rはリュードベリ定数、nは 3 から始まる整数である。

その後、紫外部にライマン系列（1906 年発見）、赤外部にパッシェン系列（1908 年発見）、ブラケット系列（1922 年発見）が見いだされ、(1)式は、次のような一般式で与えられることが示された。

$$1/\lambda = R\ \{(1/n_1^2) - (1/n_2^2)\} \qquad (2)$$

ここで、n_1，n_2は正の整数で、$n_1 < n_2$であり、n_1はライマン系列では 1、バルマー系列では 2、パッシェン系列では 3、ブラケット系列では 4 である。

ボーア（N. Bohr）は、ラザフォード（1908 年、ノーベル化学賞を受賞）が 1911 年に原子核を発見し、提案した原子モデル（原子の中心には正の電荷を有するごく小さな核があり、電子はずっと離れたところを運動している）と、プランク（M. Planck）（1918 年、ノーベル物理学賞を受賞）が 1900 年に導入したエネルギー量子の考えを用いて、この輝線の発生機構を水素原子の構造と結びつけて解明した（1913 年）。

ボーアは、水素原子にはいくつかの特定のエネルギー状態があり、電子が種々の半径をもった軌道を運動している（$h/(2\pi)$の整数倍の角運動量をもつ軌道だけが許される。核の周りの円軌道を電子はエネルギーを失うことなく運動する。hはプランク定数）ことに対応しており、一つの軌道（エネルギー準位）から他の軌道に電子が移るときにエネルギーを電磁波（光）として放出または吸収すると考えた。図８[4]に、水素原子が光を放出するしくみを示す。ボーアは原子核に基因する性質と核外電子系に基因する性質を区別して考え、光のスペクトル、X 線スペクトルなどを含む原子の化学的性質は核外電子系によるものであることを明らかにした。1922 年、ボーアはノーベル物理学賞を受賞した。

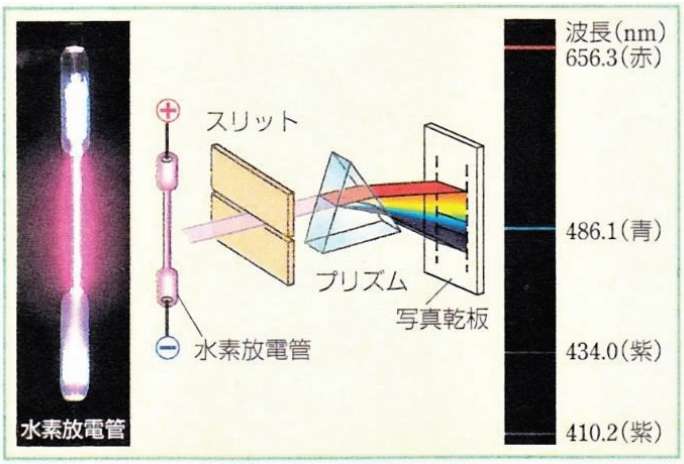


図 7. 水素原子の輝線スペクトル(バルマー系列)[4]

この研究をもとに、その後ゾンマーフェルト（A. J. Sommerfeld）らにより一般の原子の構造が明らかにされ、元素の周期表で、原子番号とともに元素の性質が変わり、類似した性質の元素が周期的に現れるという元素の周期律に理論的根拠が与えられた。

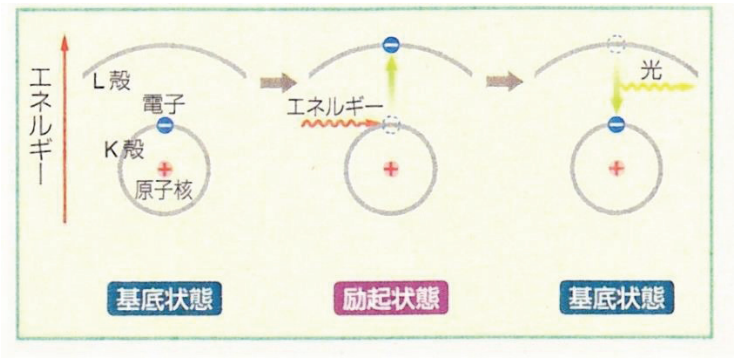


図 8. 水素原子のエネルギー吸収・放出機構 [4)]

(1)、(2)式中の n は、主量子数で n=1 が基底状態、n=2、3、4…となるにつれて高いエネルギー状態を示す。そして、n=1 のエネルギー準位を K 殻、2 を L 殻、3 を M 殻、4 を N 殻、5 を O 殻、6 を P 殻と呼ぶ。

９．安定同位体の発見

前述の希ガスの発見、原子構造の解明に加えて気体放電の実験により得られた研究成果に、J.J.トムソンによる安定同位体の発見がある。

1910 年頃、ソディ（F. Soddy）（1921 年、ノーベル化学賞を受賞）は放射性元素の化学的研究から、化学的性質は同じでも放射能の性質については違いのある二つ以上の物質があることを見出した。このことを、これらは「アイソトピック（同位）」の関係にあるといい、ソディは「アイソトープ（同位体）」という術語を提案した。

このソディの研究とは独立に、1912 年頃、J.J.トムソンは、クルックス管の中でできる正に帯電した粒子（陽極線）についての研究を、ネオンガスを用いて行っていた。そして、彼自身が電子を発見した実験のときと同様に、粒子の流れに電場や磁場をかけてその比電荷の測定を行った。その中で粒子の流れに 2 種類あることを見いだした。つまり、ネオンは 1 種類のガスではなく、2 種類のガスの混合体で、一つは原子質量がほぼ 20 で、もう一つは 22 であった。これによりネオンの原子量が整数でない理由が明らかになった（後に原子質量 21 の同位体の存在も明らかになる）。この研究により、放射性元素で見つけられていた同位体が、安定元素にも存在していることが明らかとなった。

１０．中性子の発見

ここで、なぜ同位体が存在するのかが大きな問題となってくる。それは、諸元素の原子番号（原子核中の正電荷の数、つまり陽子数）と原子量との間には、なぜおよそ 2 倍の違いがあるのかにもつながる問題である。このことは、当時の科学者を悩ませていたが、1932 年、チャドウィックは α 線をベリリウムに照射し、そこから発生してきた放射線をパラフィンに当て、その結果生成してきた陽子を測定した。そして、この過程を詳細に検討してベリリウムから発生してきた放射線が陽子とほぼ同じ質量をもつ中性の粒子（中性子と命名された）であることを明らかにした。これにより、原子核は陽子と中性子から構成されていることが示されたのである。チャドウィックは、この業績により、1935 年のノーベル物理学賞を受賞した。この中性子の発見により、原子の構造を正しく理解することができ

るようになった。

１１．おわりに

ここまで、クルックス管を用いた真空放電の研究から得られた成果と気体放電の研究からの成果について紹介してきたが、あらためてこのおよそ100年前の研究者の奮闘ぶりについて振り返ってみると、彼らの研究にかける熱い思いが伝わってくると同時に研究成果の情報の伝達が思いのほか早かったことに驚かされる。レントゲンの結果は数週間のうちに広まり、各地で追試が行われている。

本稿では触れなかったが、レントゲンの研究について紹介する講演を聞いていたベクレル（H. Becquerel）が、この結果に触発され、それからわずかひと月あまり後には、ウランの放射能の発見を成し遂げている。そして、この放射能発見を受けてキュリー夫妻（P. Curie, M. S. Curie）が、ウラン鉱物中にさらに高い放射能をもつ物質を見つけ、それにより新元素（放射性元素）ポロニウム、ラジウムを発見した（ベクレルとキュリー夫妻は1903年のノーベル物理学賞を同時に受賞している）。それがその後のラザフォードの放射性元素の壊変の発見へとつながっていった。その間に経過した時間は10年に満たない。それまで、原子は物質を構成している安定な最小単位とされていたが、それが永遠に不滅のものではないということがこの数年のうちに明らかにされたのであった。

そして、本稿で紹介した当時の研究者たちが、それぞれの研究に取り組み、その成果を得たときの年齢が非常に若かったことにも気付かされる。当時の研究者たちが既成の概念にとらわれず自由な発想で独自に研究を進めていったことが容易に想像される。レントゲンがX線を発見したとき、彼は50才になっていたが、これがここで紹介した中では一番年齢が高い方の例である。

本稿では、クルックス管を用いた真空放電、気体放電の研究に焦点を当て、19世紀後半から20世紀前半にかけての自然科学にとっていわばルネサンスともいうべき時期に行われた研究について要点を絞って、できるだけ時系列に沿って紹介してきた。ここで紹介した内容が、2021年度から実施される新学習指導要領のもとでの教育指導に少しでも資することがあれば幸いである。

---

*本稿は、2019年11月24日開催の放射線教育フォーラム令和元年度第2回勉強会での講演をもとにまとめたものである。

**日本大学文理学部非常勤講師、京都大学名誉教授

参考文献

1）電子と原子核の発見　ワインバーグ著　日経サイエンス社（1986）
2）ライフ　人間と科学シリーズ「物質の構造」　タイムライフブックス（1977）
3）化学の原典８　元素の周期律　東大出版会（1976）
4）フォトサイエンス　化学図録（改訂版）　数研出版（2012）
上記のほか、本稿をまとめるにあたって以下の文献を参照した。
・ X線からクォークまで　セグレ著　みすず書房（1999）
・ 化学の原典３　構造化学　東大出版会（1974）
・ 化学の原典９　希ガスの発見と研究　東大出版会（1976）
・ フォトサイエンス　物理図録（改訂版）　数研出版（2019）

「放射線教育」 *Radiation Education*
Vol. 23, No. 1, 13-22 (2019)

【解説】

原子をつくる：人工元素物語

工藤博司
東北大学大学名誉教授
〒982-0026 仙台市太白区土手内 1-2-3
E-mail: kudo.hrs@nifty.com

(2020 年 2 月 17 日受理)

1. はじめに

2019 年は、メンデレーエフが 1869 年 3 月 6 日にロシア化学会の講演で周期表を提案してから 150 年にあたり、ユネスコはそれを記念して国際周期表年 2019（International Year of the Periodic Table of Chemical Elements 2019; IYPT2019）に制定し、我が国でも日本化学会を中心に多くの記念行事が催されました。奇しくも 3 年前には、理化学研究所 (理研) で合成に成功した 113 番元素の名称が IUPAC (国際純正・応用化学連合) によってニホニウム (Nihonium; Nh) と認められ、日本発の元素として初めて周期表に載りました。メンデレーエフが原子量を基にした周期表を発表した時に知られていた元素はわずか 63 種類でしたが、現在ではニホニウムと同時に名称が確定した他の 3 元素 (モスコビウム Mc，テネシン Ts, オガネソン Og) を含めて 118 元素になり、周期表の第 7 周期までが埋められました (**図 1**)。そのうち、93 から 118 番までの 26 元素と 43 番のテクネチウム (Tc)、それに 61 番のプロメチウム (Pm)を加えた 28 元素は自然界に存在しない人工元素です。この機会に、人工元素を中心に元素の発見と合成の歴史を振り返ってみます。

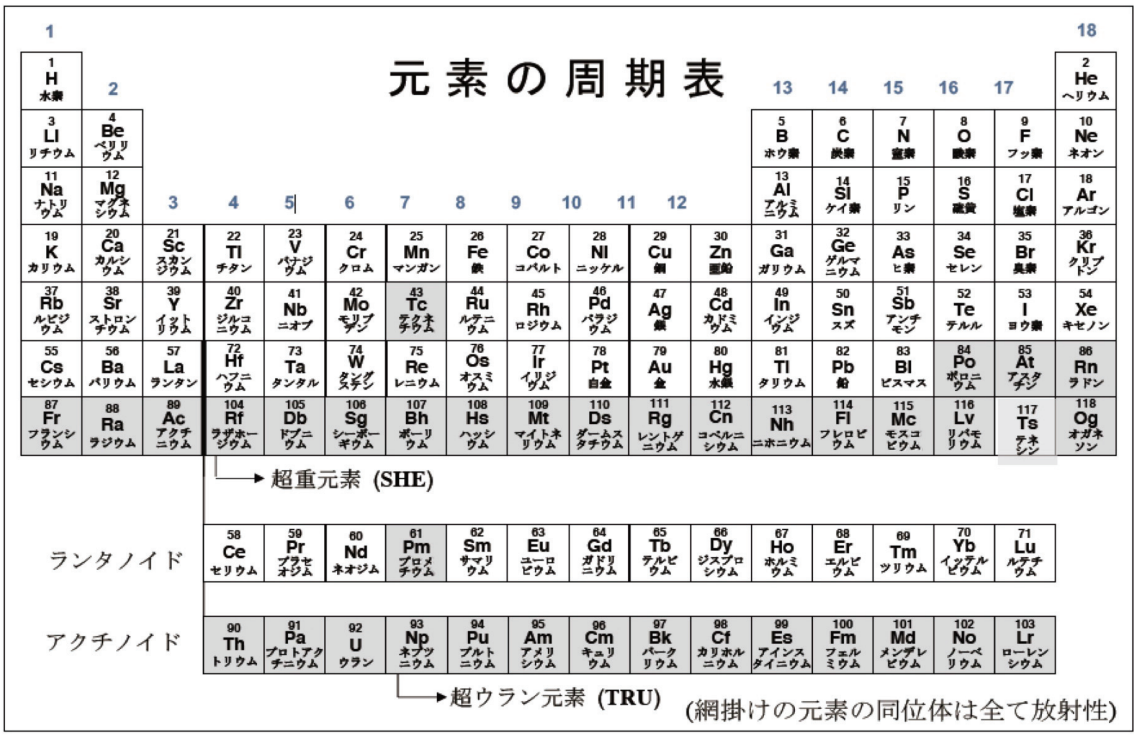
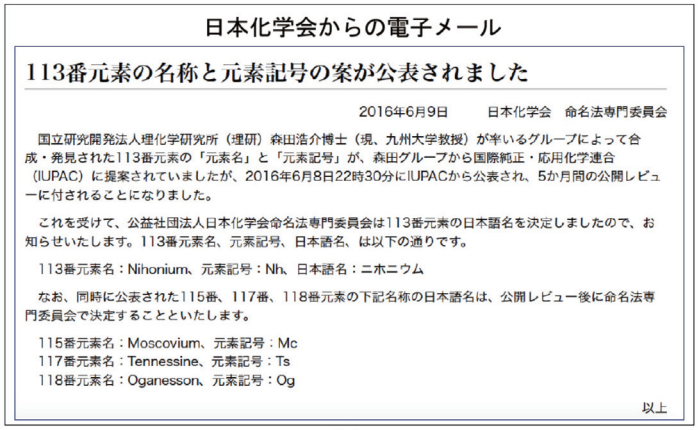


図 1

2. ニホニウムとニッポニウム

IUPAC は 2016 年 6 月 8 日のプレスリリースで、113 番、115 番、117 番および 118 番元素の名称と元素記号をそれぞれ Nihonium (Nh)、Moscovium (Mc)、Tennessine (Ts)、Oganesson (Og)とすると発表しました。これを受けて、日本化学会命名法専門委員会はその翌日、異例の速さで Nh の日本語名をニホニウムとすると発表し、会員に直接電子メールで伝えました(**図 2**)。他の 3 元素については、公開レビュー終了後の 11 月にそれぞれの日本語名称をモスコビウム、テネシンおよびオガネソンと決定し公表しました。



日本化学会からの電子メール

113番元素の名称と元素記号の案が公表されました

2016年6月9日　日本化学会　命名法専門委員会

国立研究開発法人理化学研究所（理研）森田浩介博士（現、九州大学教授）が率いるグループによって合成・発見された113番元素の「元素名」と「元素記号」が、森田グループから国際純正・応用化学連合（IUPAC）に提案されていましたが、2016年6月8日22時30分にIUPACから公表され、5か月間の公開レビューに付されることになりました。

これを受けて、公益社団法人日本化学会命名法専門委員会は113番元素の日本語名を決定しましたので、お知らせいたします。113番元素名、元素記号、日本語名、は以下の通りです。

113番元素名：Nihonium、元素記号：Nh、日本語名：ニホニウム

なお、同時に公表された115番、117番、118番元素の下記名称の日本語名は、公開レビュー後に命名法専門委員会で決定することといたします。

115番元素名：Moscovium、元素記号：Mc
117番元素名：Tennessine、元素記号：Ts
118番元素名：Oganesson、元素記号：Og

以上

図 2

森田浩介 (1957 –)

113 番元素は、理化学研究所 (理研：埼玉県和光市) の森田浩介主任研究員 (九州大学大学院理学研究院教授) のグループが加速器を使って合成に成功した新元素です。2004 年 6 月から 2012 年 8 月にかけて 3 個の原子を合成しました。ただ、ロシアの合同原子核研究所 (ドブナ) と米国のリバモア国立研究所 (カリフォルニア州) の共同研究チームは理研の発見より少し前にこの 113 番元素の発見を報告し、その後さらに数十個の原子を合成していました。そのため、両者の間に 10 年以上にわたる命名権争いが続いていたのですが、軍配は理研にあがり、2015 年 12 月 31 日の早朝、命名権決定の電子メールが森田教授宛に届きました。その根拠については後述しますが、この知らせを受けた森田教授は検討の結果、元素名を日本の国名をとって Nihonium と決め、IUPAC に提案しました。Nipponium (ニッポニウム) とする案もありましたが、それは無理でした。

新元素の命名に関してはいくつかの原則があります。国名や地名 (アメリカ、バークレーなど)、科学者の名前 (キュリー、アインシュタインなど) 、神話 (プロメテウス) や天体名 (ネプチューン) に由来する名称は認められますが、過去に使われた名称は提案できません。実は、ニッポニウムという名称は過去に使われていました (**図 3**)。

小川正孝 43番元素を発見？(1908/明治41年)
ニッポニウム (Np) と命名!
しかし、43番元素は天然には存在せずこの発見は誤りとわかり、幻の元素といわれた。もし、周期表の 1 段下に当てはめていれば、ニッポニウムは残った (今は$_{75}$Re)。

43番元素はセグレらが加速器を使って合成 (1937年)
^{96,97}Mo(d,xn)^{97m}Tc ($T_{1/2}$ = 91 d)
→ ^{97}Tc ($T_{1/2}$ = 2.6×10^6 y)
[x=1, 2]
テクネチウム (Tc) と命名
初の人工元素

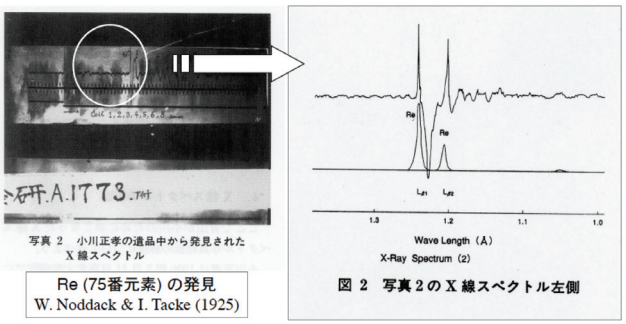
小川正孝 (1865-1930)
東北帝国大学理科大学学長
化学第一講座 (無機化学) 教授
(1911年/明治44年~)

Emilio G. Segré (1905-1989)
1959年に反陽子の発見で
ノーベル物理学賞受賞

図 3

東北帝国大学理科大学の初代学長 (後に第 4 代総長) であり、化学第一講座の初代教授を務めた小川正孝 (1865~1930) は、1908 (明治 41) 年に 43 番元素を発見してニッポニウムと名付け英国の *Chemical News* 誌に 2 編の論文を発表しました。[1, 2] 世界的にも注目され、ローリングの周期表 1909 年版に Nipponium (Np) として掲載されていたのです。小川は 1904 年春から 1906 年夏まで英国ロンドン大学に

留学し、ラムゼー教授 (W. Ramsay; 空気中の希ガスの発見で 1904 年にノーベル化学賞受賞) の指導でトリウムを主成分とするトリアナイト鉱の中に新元素を探す研究をしていました。元素発見熱が盛り上がっていた時期でした。研究開始から比較的早い時期に全く新しい光学スペクトルが得られ、新元素の兆候を掴んだものの確証はなく、帰国後に東北帝国大学教授に就任してからも粘り強く研究を続けたのですがなかなか再現性のよい結果が得られず、“幻の元素”と揶揄されることもありました。



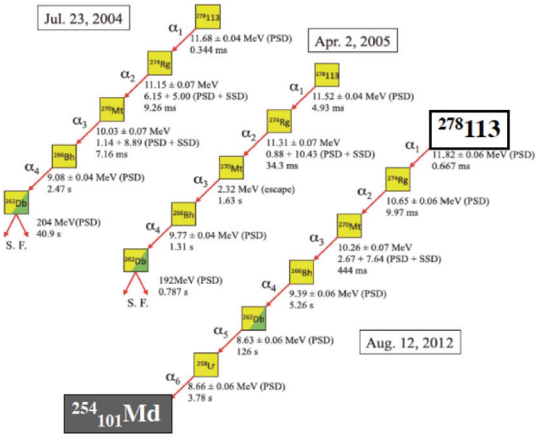
小川教授のモンモリナイトのX線分光写真
吉原賢二, *化学史研究* **30**, 69 (2003).

図 4

小川の死後に明らかになったのですが、43 番元素は自然界には存在しなかったのでした。43 番元素が実際に発見されたのは 1937 年のことでした。イタリアのセグレ (E.G. Segré) とペリエ (C. Perrier) よってカリフォルニア大学バークレー校のサイクロトロンで重陽子に曝された金属モリブデンの中に見出されたのです。[3] この元素は人類初の人工元素だったことからテクネチウム (Technetium, Tc) と名付けられました。

もし、小川のニッポニウムが周期表でもう一段下の 75 番元素の欄に位置付けられていれば、その元素名は今でも残っているはずなのですが、不運にも“幻の元素”に終わってしまいました。しかし、吉原賢二東北大学名誉教授 (専門は放射化学) は、小川の発見を“幻の元素”に終わらせたくないとの思いから化学史の研究を進め、小川が発見したのは 75 番元素であるとする論文を 1997 年に発表しました。[4-7] 吉原は、小川の遺品の中に彼が日本での研究に使用したモリブデンを主成分とする鉱物モリブデナイトの X 線分光写真乾板を発見し、その写真にある 2 本のスペクトルがまさにレニウムの $L_{\beta 1}$ と $L_{\beta 2}$ 線に一致することを突き止めたのです (**図 4**)。75 番元素は小川の新元素発見から 17 年後の 1925 年にドイツのノダック (W. Noddack) らによって発見され、レニウム (Rhenium, Re) と名付けられました。[8]

ニッポニウムは周期表から消えましたが、新たにニホニウムが日本発の新元素として登場しました。森田らは理研仁科加速器施設の線形加速器 RILAC (variable-frequency linear accelerator) を使って亜鉛イオン ($^{70}_{30}Zn^{n+}$) を高速に加速し、ビスマス ($^{209}_{83}Bi$) の標的に当てることにより発生した質量数 278 の 113 番元素 ($^{278}113$) を GARIS と名付けた気体充填型反跳分離器 (Gas-filled Recoil Ion Separator) を用いて原子 1 個 1 個の質量とエネルギーを精密に分析し、壊変の度に放出されるアルファ線を時々刻々追



$^{209}_{83}Bi + ^{70}_{30}Zn \rightarrow ^{278}113 + n$ 反応により生成した113番元素の壊変
K. Morita *et al.* : *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 103201 (2012).

図 5

跡しました。その実験では、4 ないし 5 回のアルファ壊変を経て生成する娘核種の質量と壊変の際に放出されるα粒子のエネルギーを順次測定したのです。**図 5** に示すように、2004 年に 1 個、[9] 2005 年に 1 個の 113 番元素が出現し、実験は順調にスタートしたように思われたのですが、それから 7 年間は何度試しても 113 番元素は現れませんでした。後で分かったのですが、彼らの実験条件における次の反応

$$^{209}_{83}\mathrm{Bi} + ^{70}_{30}\mathrm{Zn} \rightarrow ^{278}113 + n \qquad (1)$$

の確率は 400 兆分の 3 と極限に近く低かったので無理もなかったのです。2012 年 8 月 12 日に待ちに待った 3 個目がついに現れました。[10] しかも幸運なことに、この 3 個目の 113 番元素の原子核 ($^{278}113$) はアルファ粒子を 6 回放出して (1 個目と 2 個目は 4 回のアルファ壊変の直後に自発核分裂により消滅)、既に知られていた 101 番元素メンデレビウムの原子核 ($^{254}\mathrm{Md}$) にたどり着いたことを確認できたのです (**図 5**)。

ロシアと米国の共同研究チームは 2004 年 2 月にカルシウム ($^{48}\mathrm{Ca}$) をアメリシウム ($^{248}\mathrm{Am}$) に衝突させて 115 番元素 ($^{288}115$) を合成し、そのα壊変で生成した原子の中に 113 番元素を見つけたと報告しました。[11] その後さらに数十個の 113 番元素を合成したとして命名権を主張していたのですが、壊変経路の追跡で確認できたのは正体不明の原子核ばかりで、113 番元素と主張する根拠が希薄だったのです。理研チームが合成した 113 番元素の個数はわずか 3 個と少ないのですが、壊変系列の中に $^{235}\mathrm{Md}$ の存在を突き止めたことが決定的な証拠と認められて命名権獲得レースに勝利したのでした。

理研が合成した 113 番元素 ($^{278}\mathrm{Nh}$) の 寿命は 1000 分の 2 秒 (2 ミリ秒) と短く、生成した原子核 1 個の質量と運動エネルギー、さらに壊変により生成する娘核種の質量と放出されるα粒子のエネルギーを精密に測定することは容易でありません。しかし、それを可能にした分離装置 (GARIS) と検出器の開発こそが $^{278}\mathrm{Nh}$ の壊変系列の確認を可能にした理研が世界に誇る匠の技です。

3. 地球上の天然元素は宇宙でつくられた

図 1 の周期表に示すように、現在 118 種類の元素が知られていますが、地球上で自然界に存在するのは原子番号 1 番の水素 (H) から 92 番のウラン (U)までのうち 43 番のテクネチウム (Tc) と 61 番のプロメチウム (Pm) を除く 90 元素です。93 番のネプツニウム (Np) から 118 番のオガネソン(Og) までの 26 元素に Tc と Pm を加えた 28 元素は人間がつくった人工元素です。

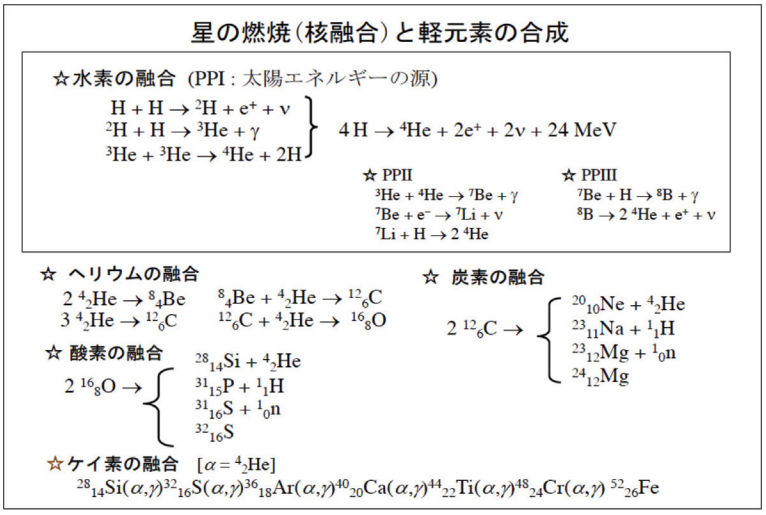


図 6

Tc と Pm も太陽系が生まれた 46 億年前には存在したと考えられますが、この 2 つの元素には安定同位体がなく、放射性同位体のみが存在します。その中で最も半減期が長いのは前者では $^{98}\mathrm{Tc}$ の 480 万年、後者では $^{145}\mathrm{Pm}$ の 18 年なので、46 億年という長い時間を経て

どちらも消えて無くなってしまったのです (消滅核種)。前節で述べたように、小川はニッポニウムを、当時の周期表で空欄になっていた 43 番に位置付けてしまいましたが、その欄に置く元素は天然に存在しないことなど当時は知る由もありませんでした。

天然にある元素は星 (恒星) の燃焼 (核融合) や超新星爆発でつくられます。その原料は 138 億年前のビッグバンの 3 分後には既に存在した水素 (H)です。太陽などの恒星は軽い元素を融合させて重い元素に変え、熱や光、ニュートリノ (ν) を出します。水素の核融合でヘリウムが生まれ、水素がなくなるとヘリウムが核融合を始めます。現在の太陽では、水素の原子核 4 個が融合してヘリウム-4 (^{4}He) になる PPI 過程と呼ばれる核融合反応が続いています (**図 6**)。アインシュタインの有名な式 $E=mc^2$ によると、エネルギー（E）と物質の質量（m）は等価で入れ替わります。光の速さ（c）はとても大きな数なので、わずかな質量でも大きなエネルギーを生み出します。太陽は骨身を削って私たちに恵みを与えてくれていますが、毎秒 40 億キログラムずつ軽くなっていて、50~60 億年後にはエネルギーを放出できない赤色巨星となり、その後白色矮星となって“星の死”を迎えます。

星は元素の製造工場です (**図 6**)。^{4}He 原子が 2 個融合してベリリウム-8 (^{8}Be) に、^{4}He が 3 個融合して炭素-12 (^{12}C) に、さらに ^{12}C が ^{4}He と融合して酸素-16 (^{16}O)にという具合に星の中で元素の合成が進みます。しかしどこまでも続くわけではなく、一連の核融合反応による元素合成は原子番号 26 の鉄-52 (^{52}Fe) で止まってしまいます (**図 6**)。核融合反応によるエネルギー放出がなくなるためです。それより先の原子番号の元素をつくるためには、既に生成した元素の原子核に多量の中性子 (n) を短時間に入れてやる必要があります。それを可能にするのが超新星爆発です。太陽の 8 倍以上の質量をもつ星の寿命が尽きる時、突然大爆発を起こして中性子星やブラックホールになる星の自爆です。その時、莫大な量の中性子が原子核に注入され、爆発から 1 分後にはウランまでの元素が生成します。そこでできた元素は爆発にともなって宇宙にばら撒かれ、その星間物質が再び集まって新たな星や惑星が生まれます。138 億年前のビックバン以来、そのようなことが宇宙のあちこちで頻繁に繰り返されています。

4. 現代の錬金術の始まり

前節で述べたように、地球の自然界に存在する元素は全て宇宙でつくられたものです。星の核融合反応や超新星爆発によってつくられた元素が集まって地球を構成しています。それでは、テクネチウム (Tc) とプロメチウム (Pm) 、それに原子番号 93 のネプツニウム (Np) から 118 番のオガネソン (Og) までの人工元素はどのようにしてつくられたのでしょうか。

17 世紀までは錬金術師が金をつくりたいと頑張っていましたが、化学反応で元素を変えることはできません。原子から電子を剥ぎ取ったり (イオン化) 、原子に電子を付ける (電子付加) たり、いくつかの原子同士を結び付けて分子をつくったりすることは化学反応エネルギーの範囲内でできますが、元素を変えるために必要な陽子や中性子を操ることはできません。

原子は原子核と電子からできていて、原子核は陽子と中性子で構成されます。原子核の中にある陽子の数そのものが原子番号 (Z) ですから、元素を変化させるためには、原子核の中の陽子の数を変えてやればよいことになります。それには、原子核に直接陽子を導入したり、取り除いたりする方法がありますが、中性子を取り込ませても陽子の数を増やす

ことができます。原子核の中性子の数 (N) と陽子の数 (Z) のバランスがよいと原子核は安定なのですが、この比 (N/Z) が大きくなると中性子 (n) が自ずから陽子 (p) に変化します。

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e \qquad (2)$$

ベータ壊変 (β^- decay) と呼ばれるもので、これにより原子番号が 1 つ増えることになります ($\bar{\nu}_e$は反ニュートリノ)。

陽子や中性子を操るためには原子核反応 (核反応) を用いますが、そのためには化学反応の 100 万倍ものエネルギーが必要です。星の核融合反応や超新星爆発ではもっと高いエネルギーが与えられるので、いろいろな核反応が容易に起きますが、それを地球上で実現するためには原子炉や加速器を利用します (**図 7**)。現代の錬金術と言えるもので、実際、人工元素の多くは加速器を用いてつくられました。宇宙は天然の加速器なのです。

人類が最初につくった元素は第 2 節で触れた 43 番のネチウム (Tc)です。その名称 technetium はギリシャ語で人工を意味する technetos (τεχηνετοσ) に由来します。この元素を発見したのはイタリアの物理学者セグレとペリエです。セグレは、42 番元素であるモリブデン (Mo) の原子核に陽子 (p) を 1 個加えれば 43 番元素ができると考えました。1936 年の夏に米国カリフォルニア大学バークレー校 (UC Berkley) にローレンス教授 (E. O. Lawrence; 1951 年にサイクロトロンの開発でノーベル物理学賞受賞) を訪ね、彼が 1934 年に完成させたばかりの 27″サイクロトロンで重陽子 (d) に曝されたモリブデン箔の譲渡を依頼しました。そして、イタリアに送られてきたモリブデン箔の元素分析をペリエとともに根気強く続け、1937 年 12 月に化学的性質がマンガン (Mn) やレニウム (Re) に類似する新しい元素の存在を確認し報告しました (**図 3**)。[3)]

テクネチウムには 40 種類近い同位体がありますがその全てが放射性で、最も寿命の長い ^{98}Tc でも半減期 ($T_{1/2}$) は 420 万年ですから、地球が誕生した約 46 億年前には存在していたとしても、現在は自然界に存在しないので消滅元素と呼ばれます。ただし、テクネチウムはウランの自発核分裂によっても生成しますから、天然のウラン鉱石の中には極微量の Tc が存在します。全ての同位体が放射性であるプロメチウム (最も寿命の長い同位体は ^{143}Pm; $T_{1/2}$=17.7 年) も、ウランの核分裂生成物として生れてくるので、これも天然のウラン鉱石に中に極微量ながら存在します。

一方、人工のテクネチウムは原子力発電所の使用済み核燃料中に大量に含まれています。ウランの核分裂生成物であるモリブデン (^{99}Mo; $T_{1/2}$=66 時間) のベータ壊変で発生する ^{99}Tc ($T_{1/2}$=21 万年) は核燃料中に長期間残りますから、近代の原子力事象の増加にともない、この人工元素の全世界の総量は 100 トンの域に達すると思われます。

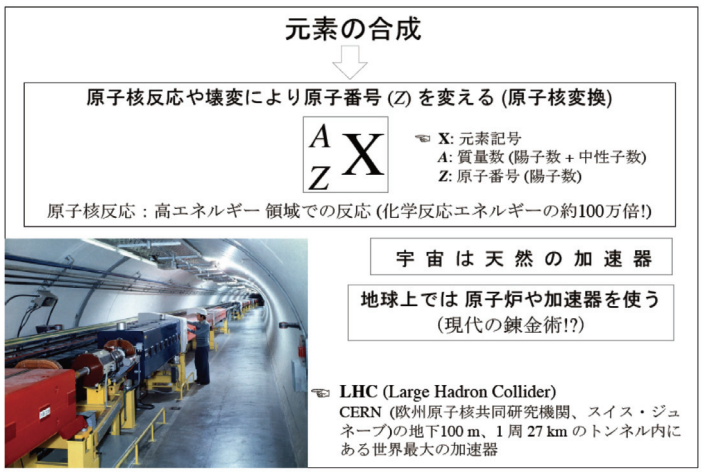


図 7

プロメチウムはランタノイド元素の一つです (**図 1**)。ランタノイド元素は互いに化学的性質が類似しているため相互分離は容易でないのですが、プロメチウムは 1940 年代の米

国のマンハッタン計画 (原爆開発) で開発された陽イオン交換クロマトグラフィーを用いる実験で、1947 年にマリンスキー (J.A. Marinsky) らによってウランの核分裂生成物からから分離されました (^{147}Pm; $T_{1/2}$=2.6 年と ^{149}Pm; $T_{1/2}$= 53 時間) 。[12] プロメチウムは青白色の螢光を発するので、その元素名はギリシャ神話に登場するプロメテウス（Promētheús、人類に火を伝えたとされる）に因んで命名されました。

5. 超ウラン元素 (TRU) の合成

93 番元素ネプツニウム (Np) から 103 番元素ローレンシウム (Lr) までの 11 元素を超ウラン元素 (TRU; Transuranium elements) と呼びます。その発見年と合成反応を **図 8** にまとめて示します。[13] 93 番の Np、94 番のプルトニウム(Pu)、95 番のアメリシウム(Am) の 3 元素は原子炉を使い、中性子 (n) を標的とする原子核に導入する反応 (中性子捕獲反応) によってつくられました。例えば、^{239}Np ($T_{1/2}$=2.3 日) は天然に最も多く存在するウラン-238 (^{238}U; 存在度 99.3%) の中性子捕獲反応 (3a) で生成する ^{239}U ($T_{1/2}$=23 分) のベータ (β^-) 壊変 (3b) によって生まれます。式 (3b) の右辺の e^- は ^{239}U の原子核から放出される高エネルギーの電子を表しますが、ベータ 粒子 (線) のことです。

$$^{238}\mathrm{U} + n \rightarrow {}^{239}\mathrm{U} + \gamma \qquad (3a)$$

$$^{239}\mathrm{U} \rightarrow {}^{239}\mathrm{Np} + e^- \qquad (3b)$$

図 8 では、この連続する 2 つの過程を ^{238}U(n,γ)^{239}U → ^{239}Np と記しています。^{238}U(n,γ)^{239}U という表記は (3a) 式のことです。この反応で生成した ^{239}Np は 2.3 日の半減期でベータ線を出して速やかに ^{239}Pu に変わります。この ^{238}U(n,γ)^{239}U→ ^{239}Np → ^{239}Pu 過程による ^{239}Pu($T_{1/2}$=24,000 年) の生成は 1941 年に確認されました。

この ^{239}Pu の発見に先立ち、1940 年には ^{238}Pu ($T_{1/2}$=87.7 年) がカリフォルニア大学バークレー校のシーボーグ (G.T. Seaborg) とマクミラン (E.M. McMillan) らによってサイクロトロンを用いる ^{238}U の重陽子(d) 照射によってつくられました。その後、サイクロトロンを利用して原子番号 96 のキュリウム (Cm) から 103 番のローレンシウム (Lr) までの超ウラン元素が次々と合成されました。この中で、99 番のアインスタイニウム (^{253}Es; $T_{1/2}$=20 日) と 100 番のフェルミウム (^{255}Fm; $T_{1/2}$=22 時間) は 1952 年に西太平洋で行われた米国の水爆実験の“灰”の中に偶然見付けられたのですが、軍事機密のため、発見は 1954 年まで伏せられていました。なお、シーボーグとマクミランは 1951 年に「超ウラン元素の発見」でノーベル化学賞を受賞しました。

超ウラン元素の合成 (1940-1961年)

シーボーグ、マクミランら (カリフォルニア大学バークレー校)

原子番号	元素 (記号)	発見年	合成反応
93	ネプツニウム (Np)	1940	^{238}U(n,γ)^{239}U→ ^{239}Np (2.3日)
94	プルトニウム (Pu)	1940	^{238}U(d,2n)^{238}Np → ^{238}Pu (87.7年)
		1941	^{238}U(n,γ)^{239}U→ ^{239}Np → ^{239}Pu (24000年)*
95	アメリシウム (Am)	1944	^{239}Pu(n,γ)^{240}Pu (n, γ)^{241}Pu→ ^{241}Am (433年)
96	キユリウム (Cm)	1944	^{239}Pu(α,n)^{242}Cm (163日)
97	バークリウム (Bk)	1949	^{241}Am(α,2n)^{243}Bk (4.5時間)
98	カリホルニウム (Cf)	1950	^{242}Cm(α,n)^{245}Cf (44分)
99	アインスタイニウム (Es)	1952	核実験(水爆) ^{253}Es (20日)
100	フェルミウム (Fm)	1952	核実験(水爆) ^{255}Fm (22時間)
101	メンデレビウム (Md)	1955	^{253}Es(α,n)^{256}Md (1.3時間)
102	ノーベリウム (No)	1958	^{244}Cm(^{12}C,4n)^{252}No (3秒)
103	ローレンシウム (Lr)	1961	$^{249-252}$Cf(^{10,11}B,xn) ^{258}Lr (4秒)

*原子炉内の核燃料中に^{239}Puが生成する反応: ^{238}U (n,γ) ^{239}Uの表記は^{238}U + n→^{239}U + γのこと

図 8

ここで少し横道にそれますが大事なことなので触れておきます。原子炉で使用するウラン燃料中には核分裂性の“燃える” ^{235}U が通常 3~5%含まれていますが (天然存在度

0.7%の ^{235}U を濃縮して使用) 、大部分は“燃えない” ^{238}U (天然存在度 99.3%) です。原子炉の中でこの ^{238}U に中性子が取り込まれると、先に述べた ^{238}U(n,γ)^{239}U→ ^{239}Np → ^{239}Pu によって ^{239}Pu がつくられるので、稼働中の原子炉の核燃料中には ^{239}Pu が時々刻々と溜まってきます。使用済み核燃料から ^{235}U と ^{239}Pu を分離精製することを核燃料再処理といい、青森県の六ヶ所村に再処理工場があります。大事なこととは、わが国が現在保有しているプルトニウムの総量です。国内の原子力発電所の使用中および使用済み核燃料中の存在量と英国とフランスに依頼して再処理済みの量を合わせると約 47 トンになります (内閣府発表)。なお、^{239}Pu は ^{235}U と同様に核分裂しやすい核種なので、核燃料として再利用が可能です。わが国でも、四国電力伊方原子力発電所（愛媛県伊方町）3 号機などで ^{235}U–^{239}Pu 混合酸化物燃料 (MOX 燃料) として実際に使われています。

6. 超重元素 (SHE) の合成

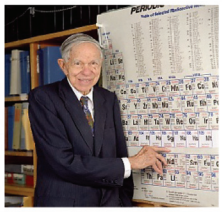
104 番元素ラザホージウム (Rf) から先の元素を超重元素 (SHE; Superheavy elements) と呼びます。現在までのところ原子番号 118 番のオガネソン (Og) までの 15 元素がつくられています (**図 9~11**)。いずれの合成実験でも重イオン加速器が用いられましたが、年代を追って 3 期に分けてみました。

第 1 期 (1960 年代末~1970 年代前半) はローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL; Lawrence Berkeley National Laboratory) の重イオン線形加速器 HILAC (Heavy Ion Linear Accelerator) を利用した元素合成です。カリフォルニア大学の放射線研究所が国立研究所に改組され、マクミランが所長を務めていた頃 (1958~1972 年) の研究が中心です。シーボーグの指導で原子番号 104 のラザホージウム (Rf)、105 番のドブニウム (Db) そして 106 番のシーボーギウム (Sg) の 3 元素がつくられました (**図 9**)。標的にした原子核はいずれもカリホルニウム-249 (^{249}Cf) ですが加速粒子は異なり、それぞれ ^{12}C、^{15}N、^{18}O などのイオンでした。Sg という元素名は TRU を含め元素合成の中心的役割を果たしたシーボーグに因んで命名され、発見から 14 年後の 1998 年 5 月に IUPAC に認められました。**図 9** の写真は、新しい周期表に載った Sg を指差すシーボーグ本人です。存命中の科学者の名が元素名に採用されたのはこれが初めてでした。

なお、ラザホージウム (Rf) は 1908 年に「元素の崩壊と放射性物質の研究」でノーベル化学賞を受賞した英国の科学者ラザフォード (Ernest Rutherford)に、ドブニウム (Db) はロシアの合同原子核研究所 (JINR; Joint Institute for Nuclear Research) があるモスクワ近郊の科学都市ドブナ (Dubna) の地名に因んで命名されました。

超重元素(SHE)の合成 [第1期 (1969-1974年)]
重イオン加速器HILACを利用
米国 LBNL (ローレンス・バークレー国立研究所)/Berkeley

104	ラザホジウム (Rf)	1969	^{249}Cf (^{12}C,4n) ^{257}Rf (4.4秒)
105	ドブニウム (Db)	1970	^{249}Cf (^{15}N,4n) ^{260}Db (1.8時間)
106	シーボーギウム (Sg)	1974	^{249}Cf (^{18}O,4n) ^{263}Sg (1.9分)



☜ **周期表の Sg (シーボーギウム) を指さす G.T. Seaborg本人** (1998年5月)
Sgは存命中の人に因んで1977年に命名された最初の元素 (Seaborg は1951年に「超ウラン元素の発見」でノーベル化学賞を受賞)

図 9

第 2 期 (1980 年代) の主役は、1969 年に設立されたドイツの重イオン研究所 (GSI; GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung) でした。ミュンツェンベルク (G. Münzenberg) やホフマン (S. Hofmann) らが 1975 年に完成した大型の線形加速器 (UNILAC; Universal Linear Accelerator) を使って高速に加速した

^{54}Cr や ^{58}Fe イオンを ^{209}Bi や ^{208}Pb の標的に当て、107 番のボーリウム (Bh) 、108 番のハッシウム (Hs)、109 番のマイトネリウム (Mt) の 3 元素をつくりました (**図 10**)。 この方法は“冷たい核融合”と呼ばれ、[14] その後の超重元素 (113 番まで) の合成にも利用されました。また、一連の合成研究に欠かせなかったのは加速器に直結した大型の分離装置 SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) の開発でした。

超重元素(SHE)の合成 [第2期(1980-1985年)]
線型加速器 (UNILAC) を利用
ドイツGSI (重イオン研究所)／Darmdtadt

107	ボーリウム (Bh)	1981	^{209}Bi (^{54}Cr,n) ^{262}Bh (83ミリ秒)
108	ハッシウム (Hs)	1984	^{208}Pb (^{58}Fe,n) ^{265}Hs (1.9ミリ秒)
109	マイトネリウム (Mt)	1982	^{209}Bi (^{58}Fe,n) ^{266}Mt (1.7ミリ秒)

図 10

ボーリウム (Bh) は量子力学を育てたデンマークの理論物理学者ボーア (Niels Bohr)、108 番のハッシウム (Hs) は GSI の所在地であるドイツのヘッセン州の地名、109 番のマイトネリウム (Mt) は核分裂を発見したオーストリアの女性科学者マイトナー (Lise Meitner) に因んで命名されました。

第 3 期 (1990 年代~2000 年代) には、日本の理研も大いに貢献しましたが、引き続 GSI がリードし、ロシアと米国の共同研究チームが大きな成果をあげました (**図 11**)。

GSI では加速粒子を ^{54}Cr や ^{58}Fe から ^{62}Ni、^{64}Ni、^{70}Zn イオンに変え、冷たい核融合反応によって新たに 110 番から 112 番までの元素の合成に成功しました。110 番元素の名称は GSI の所在都市ダルムシュタットの都市名からダームスタチウム (Ds)、111 番は X 線を発見し 1901 年に世界初のノーベル物理学賞を受賞したドイツの科学者レントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen) に因んでレントゲニウム (Rg)、そして 112 番は地動説を唱えて世界観を変えたポーランドの科学者コペルニクス (Nicolaus Copernicus) に敬意を払ってコペルニシウム (Cn) と命名されました。

113 番元素ニホニウム (Nh) の最初の 1 個は 2004 年に理研の森田らによって理研の線形加速器 RILAC を用いてつくられましたが、詳しくは第 2 節で述べたとおりです。

超重元素(SHE)の合成 [第 3期 (1994-2006年)]
重イオン加速器による核融合反応

GSI (ドイツ)：線型加速器 UNILAC			
110	ダームスタチウム (Ds)	1994	^{208}Pb (^{62}Ni,n) ^{269}Ds (0.2 ミリ秒)
		1994	^{208}Pb (^{64}Ni, n) ^{271}Ds (0.1ミリ秒)
111	レントゲニウム (Rg)	1994	^{209}Bi (^{64}Ni,n) ^{272}Rg (3.8 ミリ秒)
112	コペルニシウム(Cn)	1996	^{208}Pb (^{70}Zn,n) ^{277}Cn (0.7ミリ秒)
RIKEN (理化学研究所) 和光市：線型加速器 RILAC			
113	ニホニウム (Nh)	2004	^{209}Bi (^{70}Zn,n) ^{278}Nh (2ミリ秒)
FLNR (ロシア)–LLNL (米国) 共同チーム：U-300/U-400サイクロトロン			
114	フレロビウム(Fl)	1999	^{244}Pu (^{48}Ca,3n) ^{289}Fl (2 秒)
115	モスコビウム (Mc)	2004	^{243}Am (^{48}Ca,3n) ^{288}Mc (90 ミリ秒) α ↳ ^{284}113 (0.5 秒)
116	リバモミウム (Lv)	2000	^{248}Cm (^{48}Ca,4n) ^{292}Lv (13 ミリ秒)
117	テネシン (Ts)	2010	^{249}Bk (^{48}Ca,4n) ^{293}Ts (22ミリ秒)
118	オガネソン (Og)	2006	^{249}Bk (^{48}Ca,3n) ^{294}Og (0.7ミリ秒)

図 11

114 番から 118 番までの 5 元素はロシアのフリョーロフ核反応研究所 (FLNR; Flerov Laboratory of Nuclear Reactions)と米国 のローレンスリバモア国立研究所 (LLNL; Lawrence Livermore Natiobal Laboratory) の共同研究チームによってつくられました。彼らはドブナの JINR 内にある FLNR の U-300 あるいは U-400 サイクロトロンで ^{48}Ca イオンを加速し、^{244}Pu、^{243}Am、^{248}Cm、^{249}Bk などの標的にぶつけたの

ですが、ここで使った ^{48}Ca (天然存在度 0.19%) は濃縮して使わなければならず、標的とした原子は全て人工元素という特殊なものだったため、これらの試料を確保していた LLNL の協力が必要でした。

114 番元素フレロビウム (Fl) の名称は FLNR に因んで、115 番のモスコビウム (Mc) はロシアの首都モスクワの地名、116 番のリバモリウム (Lv) は共同研究チームの米国 LLNL の貢献に敬意を表し、117 番のテネシン (Ts) は標的として使った ^{249}Bk の供給元であった米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL; Oak Ridge National Laboratory) の所在地テネシー州の地名に因んで付けられました。118 番元素のオガネソン (Og) は、一連の超重元素合成研究でロシア—米国共同研究チームを指揮したロシアの科学者ユーリ・オガネシアン (Yuri Tsolakovich Oganessian) の功績を称えて命名されました。存命の科学者の名が元素の命名に使われたのはシーボーグに次いで二人目です。彼は日本の研究者とも親交が深く、何度も来日しています。

Yu. Ts. Oganessian (1933 –)

7. あとがき

118 番で周期表の第 7 周期は全て埋め尽くされ、次の狙いは 119 番元素です。理研の森田らは誰も踏み入れたことのない第 8 周期に歩を進めようと、2017 年から加速器 (RILAC) のパワーを増強中で、準備が整えば 2020 年度中にも 119 番元素の合成実験を開始する予定です。ただ、119 番元素が第 8 周期の先頭に収まるとは限りません。技術的には原子の寿命が数秒以上あれば原子 1 個でも化学的性質を調べることが可能なので、秒単位の寿命をもつ新元素の出現が切望されています。[15, 16]

参考文献

1) Ogawa, M., *Chem. News* **98**, 249-251 (1908).
2) Ogawa, M., *Chem. News* **98**, 261-264 (1908).
3) Perrier, C., Segré, E., *J. Chem. Phys.*, **5**, 712-716 (1937).
4) Yoshihara, K., *Radiochim. Acta*, **77**, 9-13 (1997).
5) Yoshihara, H. K., *Hist. Scientiarum*, **9**, 247-269 (2000).
6) 吉原賢二、*化学史研究* **30**, 69 (2003).
7) Yoshihara, H. K., *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **84,** 232 (2008).
8) Noddack. W., Tacke, I. and Berg, O., *Nautrwiss.* **26**, 567 (1925).
9) Morita, K. 他, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 2593 (2004).
10) Morita, K. 他, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 103201 (2012).
11) Oganessian, Yu. Ts. 他, *Physical Review C* **69**, 021601 (2004).
12) Marinsky, J.A., Glendenin, L. E., Coryell, C. D., *J. Am. Chem. Soc.* **69**, 2781 (1947).
13) Nagame, Y., Hirata, M., *Radiochim. Acta* **99**, 377–393 (2011).
14) Hofmann, S., *Radiochim. Acta* **99**, 405–428 (2011).
15) Ball, P., *Nature* **565**, 552 (2019).
16) Kean, S., *Science* **363**, 466 (2019).

「放射線教育」 Radiation Education
Vol. 23, No. 1, 23-32 (2019)

【解説】

学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用

秋吉 優史
大阪府立大学 放射線研究センター
〒599-8570 大阪府堺市中区学園町 1-2
（2020 年 2 月 23 日受理）

1. クルックス管とは

クルックス管は真空放電管の一種であり、1870 年頃にウィリアム・クルックスなどによって発明され、19 世紀末のヴィルヘルム・レントゲンによる X 線の発見、J.J.トムソンによる電子の発見の際に用いられた装置である [1)]。現在では、教育現場に於ける陰極線の演示にしか使われていないが、放射線、素粒子物理の歴史の上で非常に重要な役割を果たした装置であり、加速器、放射線発生装置の元祖と言って良い。ただ単に電流は電子の流れであるという学習に留まらず、スリット付きのクルックス管による磁場、電場による電子ビームの偏向は、ブラウン管や電子顕微鏡、電子線描画装置、そして加速器と言った日常生活や研究・産業の場で用いられている装置の動作原理を学習する事が出来る。さらには、冷陰極に於ける陽イオンの衝突に伴う二次電子の放出や、ガラス管面に於ける制動放射 X 線の放出と、ガラス管自身による遮蔽、放出された X 線に対する遮蔽能が遮蔽する物質及び X 線のエネルギーにより大きく異なること、霧箱を用いた光子による電離の可視化など、放射線と物質の相互作用を学習する上でまたとない素晴らしい教材となり得る。

その構造は極めて単純であり、0.1 Pa ～ 5×10^{-3} Pa 程度に真空引きされたガラス管内に、金属製の陽極と陰極が配置されているだけである。通常の電子線発生装置はフィラメントや、電界放出型の電子源を備えており、より高い真空度が要求されるが、クルックス管はそれほど高い真空度ではなく、電極に 20 kV 程度の高電圧を印加するだけで電子線を発生させることが出来る。高電圧を印加された陰極付近では、自然放射線などによって電離された残留気体の陽イオンが加速されて電極の金属板に衝突する。この時のイオンのエネルギーが高いほど放出される二次電子の収率は大きくなり、20 keV 程度で収率（二次電子電流／陽イオン電流）は 1 を超える [2)]。放出された二次電子は電界によって加速されるが、陰極と陽極の間の電界強度は均一では無く、陰極のごく近傍でのみ加速されそれ以降ほぼ等速で電子は運動する。このことは、スリット付きのクルックス管において、陰極近傍にスリット及び金属で出来た蛍光板が置かれていても電子ビームが観察できていることから理解できるであろう。これは電離した残留気体の陽イオンと電子の移動度の差により空間電荷が生じて陰極付近にのみ強い電界が存在することによる。このため、陽極は陰極と向かい合った位置に設置する必要は無く、ガラス管面に塗布した蛍光体に電子を当てて光らせることが出来る。ガ

ラス管面に衝突した電子は表面電流として陽極に流れ込んでいると考えられる。

2. 学校教育現場に於けるクルックス管の取扱い

中学校の理科の授業において、平成 20 年 3 月に行われた学習指導要領の改訂 [3] では第一分野の「(7)科学技術と人間」の単元に於いて、エネルギー教育の一環として原子力が取り上げられており、内容の取扱に於いて「放射線の性質と利用にも触れること」との記述が新しく追加され、30 年ぶりに放射線教育が復活している。しかしながら当該の単元は 3 年生の最後に学習する内容であり、また「触れること」という表現は学習指導要領の記述の中では最も軽い扱いに留まっている。このため、入試問題として取り上げられないなどから実際に放射線教育を実施している学校はそれほど多くはなかった。

一方で、同じく平成 20 年 3 月の学習指導要領解説理科編 [4] に於いては電子・電流に関する単元においてクルックス管による電子線の観察をすることが記載されており、それに則った現行の教科書の「(3)電流とその利用」の単元に於いて、調査を行った 5 社全ての中学 2 年生理科の教科書でクルックス管による電子線の観察が既に取り上げられている。2019 年に行われた大阪府立大学の 1 回生向けの授業（工学のみ対象では無く、全学から受講される）では、回答数 90 名のうち中学校でクルックス管を観察したことのある生徒は 19 名と 2 割以上にのぼり、高校、その他と合わせると 4 割以上の学生がクルックス管を観察したことがあるという結果が得られた。これは、放射線教育を行う上で最もよく使われるであろう霧箱を見たことのある学生が 11 名しか居なかったことと比べると、非常に高い割合である。

しかしながら放射線に関する取扱いについては、啓林館と東京書籍の教科書では、レントゲンによる X 線発見の歴史的経緯が 2 年生の当該単元で取り上げられているが、大日本図書と学校図書については 2 年生の当該単元では放射線に関する記述はなく、3 年次のエネルギーに関する単元で触れられているが上述のように必ずしも学習されるわけでは無い。教師向けの指導書についても、学校図書、教育出版の 2 社については放射線に関する注意は行われていなかった。

ところが、平成 29 年 3 月に公布された中学校の新学習指導要領 [5] では同じく第一分野の「(3)電流とその利用」の単元に於いて、その内容の取扱で「電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また，真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること。」と言う内容が新しく追加されている。さらに平成 29 年 6 月に出

表 1　2016 年版 中学理科教科書に於けるクルックス管の取扱い

出版社	啓林館	東京書籍	大日本図書	学校図書	教育出版
		教科書			
クルックス管自体の取扱い	○	○	○	○	○
クルックス管に関連させた放射線に関する記述	2 年	2 年	3 年	3 年	×
		指導書			
放射線に関する注意	○	○	○	×	×

された学習指導要領の解説理科編 [6] では、「高電圧発生装置（誘導コイルなど)の放電やクルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させ，電子の流れが電流に関係していることを理解させる。その際，真空放電と関連させてX線にも触れるとともに，X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し，医療や製造業などで利用されていることにも触れる。」と、かなり詳細な内容が記載されている。当該単元は 2 年生で取り扱う内容であり、放射線については「触れること」ではあるが、クルックス管については観察を求めている。必ずしも実際に実験を行うことを求めているわけでは無いが、今後より多くの中学校に於いてクルックス管を用いた実験が行われる可能性がある。教科書でクルックス管からの放射線についても触れられているわけであり、保護者も含めて実演の際の放射線安全管理に今まで以上に関心が集まると考えられる。

高校の教科書については、啓林館、実教出版、数研出版、第一学習社、東京書籍の 5 社について調査を行ったが、高校 3 年生の物理の教科書の、原子について取り扱った単元において一番始めに取り扱われる「電子と光」という章でガイスラー管などの真空放電に続く陰極線の説明、トムソンの比電荷の実験に続いてローレンツ力の説明のためにスリット入りクルックス管が登場する。しかしながら啓林館を除いて X 線の発生については触れられていない。

3. クルックス管からの X 線漏洩の認識

クルックス管から X 線が放出されていること自体は、レントゲンによって発見されており最も古くから放射線を放出していることが知られていた装置であると言う事ができるが、現在の教育現場の教員が必ずしも認識しているわけでは無い。上述のアンケートの結果では、クルックス管を見たことがある 35 名の学生のうち、放射線が放出されていることを知っていた学生は 18 名と半数程度に留まっていた。さらに具体的にどの程度の量が漏洩しているかという事になると、一部の専門家を除いてこれまでほとんど知られていなかった [7]。我が国に於いては、1994 年に一部の製品では表面からの距離 5 cm での 70 μm 線量当量が 250 mSv/h に達することが報告されているが [8]、残念ながら広く認識されるには至らなかった。我々の研究においても、15 cm の距離における 10 分間の測定で 70 μm 線量当量が 32.6 mSv（196 mSv/h に相当）という高い線量を漏洩する装置が見つかっている。このため、放射線が放出されていることを知らずに不注意な取扱いを行うと大きな線量を被ばくする恐れがある。多忙な学校教員に過度の負担を強いることなく、不要な被ばくを子供達に与えず安全に安心して実験を行うことが出来るガイドラインの確立が強く望まれる。

4. クルックス管プロジェクト

このため、2017 年度からクルックス管から漏洩する X 線に関する安全管理を目的とした「クルックス管プロジェクト」が線量計測、放射線教育、放射線安全管理など各方面の有志により立ち上げられた [9]。

4.1 漏洩するX線の線量測定法確立

クルックス管から漏洩するのは20 keV程度と低エネルギーかつパルス状に放出されるX線であり、通常のサーベイメーターでは正しく測定できないため当初は線量の測定もままならない状態であったが、2017年度中に基礎的な線量評価手法の確立を行い、電流モードでの測定を行う電離箱か、積算量を評価する蛍光ガラス線量計やOSL線量計などの固体線量計により信頼できる線量評価が可能となった。印加電圧の測定も、抵抗値の大きい（100 MΩ以上）ガラス抵抗器などと、100 kΩ程度の小さな抵抗器を直列に繋いだ分圧器とオシロスコープによって測定を行った。線量だけでなく、CZT ($Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$) 検出器を用いたエネルギースペクトルの測定も行い、それぞれの印加電圧との相関なども明らかとなった[10,11]。

図1 ガス圧の調整器（赤丸で示す）の付いた島津製作所製のクルックス管。

4.2 第一期実態調査

2018年度には低エネルギーX線の測定に特化したガラスバッジFX型を21校の中学校に郵送することで、実際の教育現場での実態調査を行った。その際、調査対象の学校の紹介など、放射線教育フォーラム、日本科学技術振興財団など様々な関係者からの協力を頂いた。測定に際しては、普段の授業で行っている誘導コイルの設定での実演を依頼した。生徒が観察を行う1 m位置での評価を行うのに、実際に1 m位置での測定を行うと線量が低すぎて検出限界である50 μSvを下回ると考えられたため、クルックス管表面から15, 30, 50 cmの距離で測定して1 m位置に外挿することで1 m距離での線量を評価した。測定時間は教員の負担を考慮して10分間とした。その結果、後述するようにほとんどの装置で十分に低い値に留まっていたが、1本だけ、誘導コイルの放電出力を最低に設定しているにもかかわらず1 mの距離10分間で70 μm線量当量が600 μSvに達する装置が見いだされた。実効線量は後述するように60 μSv以下と見積られており、この線量自体は医療被ばくや航空機に搭乗した際の被ばく線量と比べても必ずしも大きな線量とは言えないが、現場によってはより近い距離での観察を行っている例も見られ、発生源自体の線量を低減する方法の提供と、観察を行う際の距離、時間などの目安を提示する必要性が明らかとなった。

4.3 意図しない電圧上昇

誘導コイルの放電出力を最低に設定しているにもかかわらず高い線量が漏洩していたという結果は、印加電圧を下げれば線量を抑えることが可能であると考えていた我々には衝撃的であり、その後現地に赴いての追跡調査を行った。

その結果、装置によっては封入ガス圧低下などの影響により冷陰極を叩く陽イオンが足りず電子ビームとして電流が流れにくくなっていると考えられた。クルックス管内のガス圧は管内への吸着などにより変化することはクルックスが装置を発明した時代から知られており、ガス圧を調整する調整器(softener, エネルギーが高くなると透過力の高い「硬い」X線となることを防ぐという意味だと考えられる) が設けられていた。国内でも非常に古い装置では調整器が付いている例が確認されており、古い装置であっても安定したビーム電流が得られている（図 1)。しかし、現在市販されている装置には調整器は付いておらず、経時変化などによって装置の状態が変化しうる。ビーム電流が流れにくくなった装置では、誘導コイルにエネルギーが蓄積され電圧が上昇していき、冷陰極での二次電子放出効率が高くなり電流が流れるようになるまで意図せずに高い電圧が印加されることで、結果として高い線量が漏洩するという事が考えられた。なお、このようにガス圧が小さくなり電流が流れにくくなるのは必ずしも古いクルックス管に限らない。現在販売されている製品については製造時に検査が行われており安全で有ると考えられるが、15 年程度しか経過していない製品でも高い線量を漏洩する例が見られた。

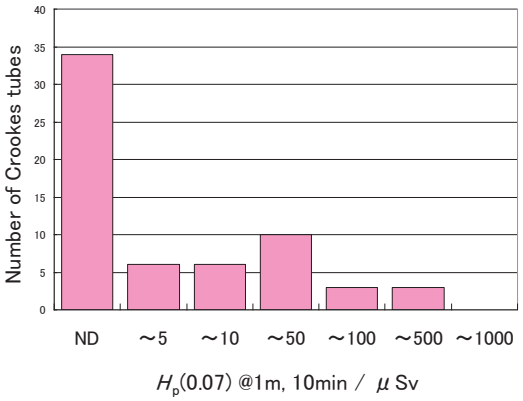


図 2 2018 年度に実施した暫定ガイドライン設定以前の実態調査結果。ND は検出限界（50 μSv@20 cm）以下。

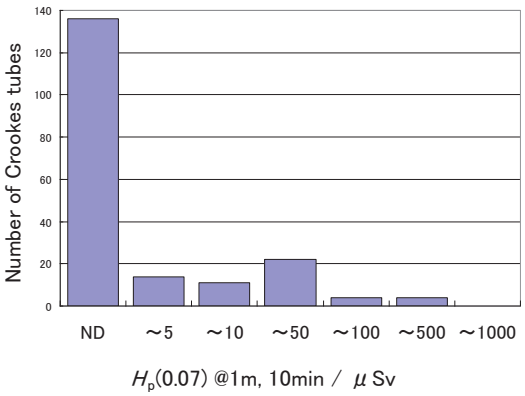


図 3 2019 年度に実施した暫定ガイドライン準拠（放電極距離 20 mm）での実態調査結果。ND は検出限界（50 μSv@20 cm）以下。

4.4 暫定ガイドラインの検討

意図しない電圧上昇を防ぐために、クルックス管と並列に接続された放電極が空中放電により電流を流す、安全弁としての役割が極めて重要であり、暫定的に 20 mmと言う放電極間距離をガイドラインとして設定した。

暫定ガイドラインに於いてはクルックス管から観察者の距離についても規定しており、クルックス管の電子線自体がきちんと観察可能であり、実際の運用上無理なく達成可能である 1 mとした。観察時間については実際には 1 本あたり数十秒で、4 種類（十字入り、磁場偏向用及び電場偏向用のスリット入り、羽根車）のクルックス管を観察してもせいぜい 2 分程度であるという意見もあったが、教員については複数回実演を行う事から、10 分という数値を目安とした。測定値からの線量評価はこの条件を元に計算している。なお、現在国内で販売されている装置には、日本理科教育振興協会から出された目安として電極間距離 4 cm、放電時間 10 秒以内、クルックス管と先生・生徒の距離 1.5 m 以上、という注意書が添付されている。今回出した暫定

ガイドラインは、距離・時間による防護よりも、より発生源からの漏洩量自体を抑えることに重きを置いていると言える。

4.5 暫定ガイドライン有効性の検証

2019 年度は、この暫定ガイドライン（放電極距離 20 mm 以下、距離 1 m 以上、10 分間以内）を遵守することにより、本当に生徒達の安全を確保出来るのか、と言う暫定ガイドラインの実効性を検証する調査を日本全国の 57 校の中学・高校において実施した。測定はクルックス管表面から 20 cm の距離のみで行い、1 m では距離の二乗に反比例して 1/25 になるとして線量を評価した。調査対象の学校の紹介においては大阪府教育委員会経由で大阪府物理研究会にも協力を頂いた。

また、2019 年度からは任意団体としてではなく、日本保健物理学会において「教育現場における低エネルギーX 線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会」[12] として活動がオーサライズされており、主に計算による実効線量評価と、国内外の規制状況の調査などを行っており、第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会に於いて企画セッションとして 6 件の発表を行った。

5. 教育現場での漏洩線量調査結果

2018 年度の実態調査の結果を図 2 に示す。調査を行った 37 本中 31 本で、クルックス管表面から 1 m の距離 10 分間での 70 μm 線量当量は 100 μSv 未満であった。

ここで、通常のエネルギーの高いγ線であれば線量計によって1cm線量当量の測定を行い、その値を実効線量とみなすが、クルックス管から漏洩する X 線は極めてエネルギーが低く、体内では 1 cm で半分程度に減衰していくため、1 cm の深さでの吸収線量は全身の実効線量を代表せず、大幅な過大評価となる。また、測定の際に検出限界の関係から1cm線量当量では 70 μm 線量当量の半分程度の値となってしまい評価が行えなくなるため（70 μm 線量当量での評価においても、37 本中 18 本は 15 cm の距離で測定しても検出限界（50 μSv）以下であった）、測定結果の評価は全て 70 μm 線量当量で行っている。

現在のところ空間的に一様ではないクルックス管からの漏洩 X 線に対して、生徒や先生が受ける全身の被ばく量を評価する実効線量評価手順は確立しておらず、専門研究会に於いてPHITSコードを用いたシミュレーションにより評価を行っているが、暫定的に保守的に見積って最も線量が高い中心点で測定された線量が均一に照射されるとして、観察する生徒はクルックス管に正対しているとした場合で実効線量評価を行った。1cm 線量当量から実効線量への換算が ICRP Pub116 Fig.5.2 [13] により与えられており、20 keV では実効線量は 1cm 線量当量の約 1/5 である。さらに水中 1 cm で約半分に減衰することから、1cm 線量当量は 70 μm 線量当量の約半分となり、実効線量は 70 μm 線量当量の約 1/10 となる。また、眼の水晶体の等価線量についても専門研究会に於いて検討を行っているが、70 μm 線量当量が保守的な評価を与える。

2019 年度の暫定ガイドライン遵守での測定結果を図 3 に示す。測定を行った 191 本中 187 本の装置については 1 m 距離、10 分間の実効線量が国際的な免除レベルである 10 μSv 以下に抑制されていることが確認された（ICRP Pub-64 [14] 潜在被ばくの防護: 概念的枠組み、及び IAEA BSS [15] に於いて免除レベルについて、NCRP Report N0.180 [16] では無視可能

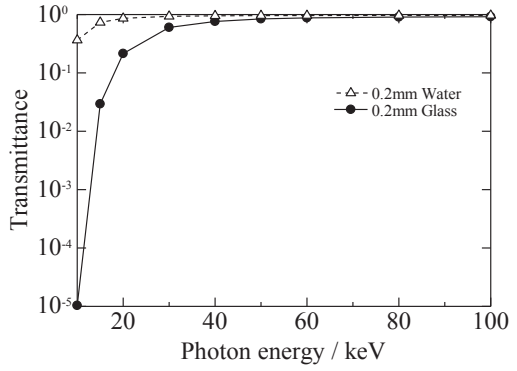


図4　2mm厚のガラス及び水に対する光子の透過率のエネルギー依存性。エネルギーが高いほど透過率は上昇するが、100keV 付近からそれほど大きく変化しないことが分かる。また低エネルギーでは物質による透過率の差が大きくなる。

個人線量について記載)。

暫定ガイドライン遵守での最も線量の高い装置では上記の条件で実効線量が 40 μSv 程度と評価されている。ICRP Pub36 [17]「科学の授業に於ける電離放射線に対する防護」では、古い単位である実効線量当量での記載であるが年間の線量限度を 0.5 mSv、個々の授業ではその 1/10 としており、観察時間の考え方から最も線量の高かった装置についても十分にこの指標を下回っていると言える。

一方で、2019 年度の多数の装置に対する実態調査において、想定していなかった装置の仕様(放電極を 20 mm まで近づけることが出来ない)も明らかとなったため、より現実的なガイドラインとするための検討が必要である。今後は、線量が高くなる装置は、何故線量が高くなってしまうのか、その原因の追及とスクリーニング手法の確立を目指す。原因としては、放電極表面に酸化皮膜などが張ることで、放電が起こりにくくなっていると言うことが考えられる。スクリーニング手法は、後に述べる電離箱や簡易型のサーベイメーターによる直接的な線量測定に加えて、中高の理科室で入手可能な電圧計や電流計、放電極での放電距離などである程度の危険性の診断が可能とならないかを検討している。

実効エネルギーが印加電圧と良い一致を示すことが確認されているため [11]、実態調査におけるガラスバッジ FX 型による X 線実効エネルギーの評価により印加電圧を見積ることが出来る。この印加電圧及びアナログ電流計で測定した電流と線量の相関のデータを検討しているが、2019 年度に測定した多くの装置(136/191)で検出限界以下であったため、未だ十分ではなく、より多くのサンプルの評価を行う必要がある。このため、2020 年度も引き続き実態調査を継続する予定である。これにより、クルックス管による電子線の観察という本来の目的の範囲内であれば、実際の線量測定を行わなくても十分な安全が確保出来ることを目指す。

6. クルックス管を活用した放射線教育

現在の教育現場ではクルックス管は電子の流れの説明に用いられているが、クルックス管から放出される X 線は放射線教育を行う上で極めて有用であり、安全を十分に確保した上で活用されることが望ましい。

クルックス管から漏洩する X 線は、そのエネルギーの低さから遮蔽材の原子番号に非常に敏感であり、図4に示すように材質の違いを明確に区別することが可能である。数 10 keV 前後の X 線はほぼ全てが光電効果によりエネルギーを失うのに対して、数 100 keV 程度のガンマ線はコンプトン効果が支配的であり、前者は原子番号 Z の 4～5 乗に比例して大きく変化するのに対して、後者は Z に比例しており同じ重さの遮蔽体ではほとんど遮蔽効果に差がなくなる。難しい遮蔽実験を行わなくても、ガラスの水槽に装置を入れて天板は同程度の厚さのアクリル板で遮蔽すると、ガラスで遮蔽された側面と天板では大きく透過率が異なることが理解できる。

この簡単な実験から、レントゲン写真は数 10 keV 程度の X 線を用いることで、軟組織と硬組織の差を透過線量の濃淡として画像化していると言う事が理解可能である。

また、図 4 に示すとおり光子のエネルギーが 100 keV 以下の領域では、わずかなエネルギーの違いにより大きくガラス管に対する透過力が異なる。クルックス管の誘導コイルの設定によりエネルギーを変化させると、線減衰係数が変化することを、複数の 0.5 mm 厚のアルミ板とクランプ、GM サーベイメーターなどで簡単に測定可能である。

さらに、クルックス管からの X 線を霧箱に入射することにより、光子が電子を弾き出す電離作用を観察することが出来る。20 keV 程度の X 線で叩き出された 20 keV 程度の光電子は空気中で 5 mm 程度の飛程しか無く、電子として遠くまで飛ぶことは出来ない。その一方で X 線は距離の二乗に従って弱くなっていくが、相当の距離を飛んでからアクリル製のチャンバーであれば透過して光電子を叩き出すことが出来る。この光子と荷電粒子の挙動の違い、さらには図 5 に示すように、元々電子線がガラス管にぶつかって X 線が発生して、最後にはまた電子として物質と相互作用するという課程は、放射線と物質の相互作用の本質を理解する上で非常に素晴らしい教材となり得る。

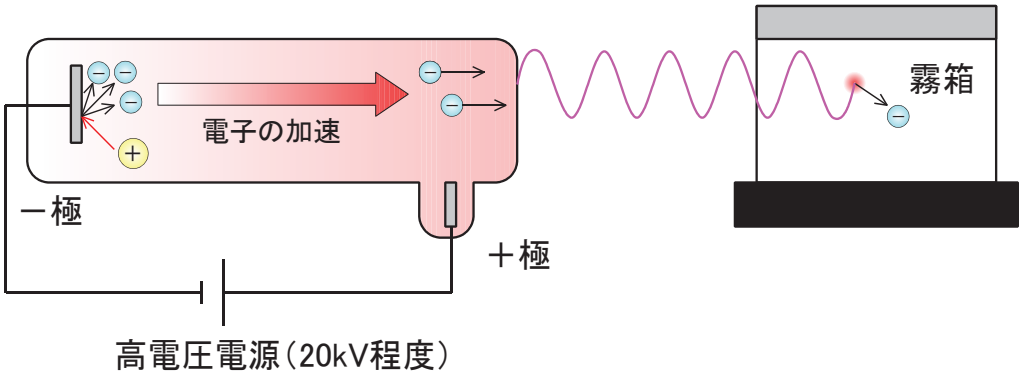


図 5　クルックス管の模式図と、電子から X 線、再び光電子に変化する様子。冷陰極において陽イオンが加速されて二次電子を叩き出し、陰極付近の電界によって加速されて電子ビームとなる。陰極ごく近傍以外では電界は弱く等速直線運動した後に、ガラス管にぶつかり制動放射 X 線を放出し、電子は止まる（20 keV 程度では電子自体はガラス管を透過できない。特性 X 線も放出されるがエネルギーが低いためやはりガラス管を透過できない）。ガラス管を透過した制動放射 X 線は、2π 方向に拡散していき、距離の二乗に従って強度が小さくなる。最終的に空気の原子にぶつかり光電効果を起こし、光電子を叩き出す。霧箱を用いると、空気中での飛程 5 mm 程度のこの光電子を観察することが出来る。

7. 教育現場での線量の確認

上記の特徴からクルックス管は放射線の性質の理解に大変優れた教材となり得るが、漏洩 X 線の管理はより厳格である必要があり、遮蔽体などにより測定者の安全を担保出来ていることを確認する必要がある。このため、箔検電器を用いた線量測定の可能性が検討されている[18,19]。箔検電器は電子式の個人線量計が普及する以前にポケットチェンバーという直読式の線量計として活用されていた歴史が有る（図 6）。理科室にある箔検電器は、あらかじめ電極に与えた電荷によって箔が開き、放射線の電離作用によって空気中に発生した電荷のうち電極とは反対の極性の電荷を収集するにつれて箔が閉じていく、開放型の電離箱として捉えることが出来る。また、電離作用という、最も重要な放射線と物質の相互作用を体感的に学習する事の出来る教材となり得る。

プラスチックシンチレーターを用いた測定機である Kind-mini の感度は、クルックス管からの X 線測定に適しており、比較対象とした GM サーベイメーター（米国 S.E.International 社製, Ranger）は 200 μSv/h 程度から飽和傾向が見られているのに対し、比較的広い範囲で線量率と計数率が線形性を示している（図 7）。線量率は低エネルギーでの校正を行った電離箱 ICS-1323（日立）を用いて測定した。この GM サーベイメーターでもコリメーターを用いることにより（フィルターを用いるとエネルギースペクトルが変化するためコリメーターの方が適している）、適切な感度に調整可能で有ると考えられるが機種により元々の感度が異なるため、線量率への対応を取ることは容易ではない。それに対して Kind-mini は公益財団法人 日本科学技術振興財団の放射線教育支援サイト「らでぃ」[20] から無料で貸出しを行っており、感度についても校正されていることから、スクリーニングを行うには十分な精度での測定が可能で有ると考えられる。今後、X 線エネルギーに対する感度の違いなどを測定していく予定である。

スクリーニングによりある程度高い線量が検出された装置に対しては、固体線量計を用いた測定を学校単位で直接依頼可能とする商業サービスを検討していく。以下にまとめた安全運用ガイドラインの遵守に加えて様々な方法で直接的に学校教育現場に於ける線量を測定可能とする手段を提供することで、安全に、教育効果の高いコンテンツを活用して頂くことを期待している。

図 6　米国製ポケットチェンバー、CDV-750 'civil defense dosimeter'。高電圧を印加して泊を開き、被ばくした線量増加と共に箔が閉じていくのをクリップの側のレンズから光源を見ることにより、直読することが出来る。

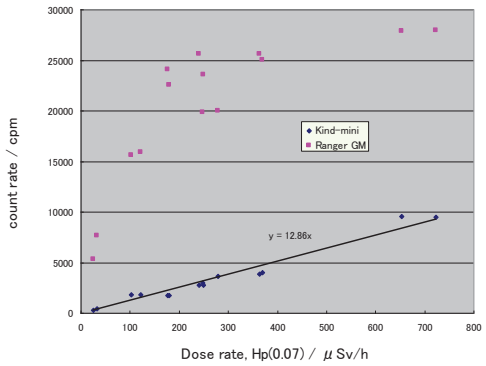


図 7　プラスチックシンチレーターを用いた簡易型サーベイメーターKind-mini とパンケーキ型GMサーベイメーター Ranger を用いた線量率と計数率の相関。線量率は電離箱を用いて測定した。

クルックス管安全運用ガイドライン

- **清浄な放電極を必ず使用し，放電極距離は 20 mm 以下とする。**
- **誘導コイルの放電出力は，電子線の観察ができる範囲で最低に設定する。**
- **できる限り距離を取る。生徒への距離は 1 m 以上とする。**
- **演示時間は年間 10 分程度に抑える。**

参考文献

1) 柴田誠一, X 線発見から原子構造の解明へ ークルックス管による放電研究がもたらした現代科学の基礎ー, 放射線教育, 23 (2019) 3-12.

2) 内池平樹,イオン衝撃による二次電子放射と絶縁物の電子状態,応用物理, **50**, 1171-1180 (1981).

3) 中学校学習指導要領, 平成 20 年 3 月, 文部科学省

4) 中学校学習指導要領解説理科編, 平成 20 年 7 月, 文部科学省

5) 中学校学習指導要領, 平成 29 年 3 月, 文部科学省

6) 中学校学習指導要領解説理科編, 平成 29 年 6 月, 文部科学省

7) 藤淵俊王 ほか, イメージングプレートを用いたクルックス管からの漏洩線量分布測定, 放射線安全管理学会誌, **10,** 40-45 (2011).

8) 大森儀郎, クルックス管から漏洩する X 線の実態とその対策,神奈川児立教育センター研究集録, **13**, 21-24 (1994).

9) 秋吉優史研究教育紹介サイト、クルックス管プロジェクトのご紹介, http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/CrookesTubeProject.htm

10) 秋吉優史, 谷口良一, 松浦寛人, 宮丸広幸, Do Duy Khiem, 神野郁夫, 濱口拓, 野村貴美, 谷口和史, 小林育夫, 川島紀子, 佐藤深, 森山正樹, 宮川俊晴, クルックス管からの低エネルギーX 線評価手法の開発, 放射線化学, **106**, 31-38 (2018).

11) Do Duy Khiem, H. Ando, H. Matsuura, M. Akiyoshi, Investigation of Low-energy X-ray Radiated from the Crookes Tube Used in Radiological Education, Radiation safety management, **18**, 9-15 (2019).

12) 教育現場における低エネルギーX 線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会, 日本保健物理学会ホームページ, http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/page.cgi?id=61

13) Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, Annals of the ICRP **40**(2-5) (2010).

14) Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework, ICRP Publication 64, Annals of the ICRP **23**(1) (1993).

15) Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014)

16) Management of exposure to ionizing radiation: radiation protection guidance for the United States, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 180 (2018).

17) Protection against Ionizing Radiation in the Teaching of Science, ICRP Publication 36, Annals of the ICRP **10**(1) (1983).

18) 森千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, 箔検電器によるクルックス管からのX線線量率の測定マニュアル, 放射線教育, 23 (2019) 33-39.

19) 森 千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, 臼井俊哉, 村上浩介, 羽澄大介, 中村嘉行, 渡辺賢一、瓜谷 章、神谷 均, 宮川俊晴, 田中隆一, 掛布智久, 箔検電器によるクルックス管からの X 線の測定, Radioisotopes, **69**, 1-12 (2020).

20) 放射線教育支援サイト「らでぃ」https://www.radi-edu.jp/

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 23, No. 1, 33 – 39 (2019)

【資料】

箔検電器によるクルックス管からのX線線量率の測定マニュアル

森 千鶴夫[1)]、緒方良至[1)]、秋吉優史[2)]
[1)] 名古屋大学、[2)] 大阪府立大学
[1)] E-mail　moric@wh.commufa.jp
(2020 年 3 月 10 日受理)

マニュアルの要約

マニュアルは、詳しく述べているので、先ずここにその要約を示す。

１）　箔検電器の表面を拭い、特に絶縁部分を綿棒などできれいにする。箔の開き角を読み取る円グラフを貼り付ける。塩化ビニールのパイプを準備する。（**2.1**、**2.2** 参照）

２）　箔検電器への正の電荷、負の電荷の荷電の方法をマスターする。（**2.2** 参照）

３）　実験室内の風をほぼなくし、ガスストーブやガスバーナーを消す。（**3.1** 参照）

４）　誘導コイルの針状電極の先端の目に見えないコロナ放電に関する実験をする。（**3.2** 参照）

５）　誘導コイルの針状電極を取り外し、50～60 cm 離れた位置に箔検電器を置き、正や負の電荷を荷電した後、誘導コイルの電源を入れて箔が閉じないことを確認する。（**3.2** 参照）

６）　クルックス管のどの面からX線が発生しているかを予想し、誘導コイル、クルックス管、箔検電器の配置を決める。箔検電器はX線の発生面からとりあえず 50～60 cm の位置に置くのがよい。（**4.1** 参照）

７）針状電極と円盤電極の距離がどの程度ならX線が発生するかを **4.2** 項の手順で調べる。（**4.2**、**4.3** 参照）

誘導コイルとクルックス管をつなぐ２本の導線はできるだけ並行になるようにする。通常は箔検電器側に陰極につなぐ線がある。（**3.1** 参照）

８）箔検電器に正の電荷を荷電し、箔の開き角が 60 度よりも少し大きな角度に調節する。（**2.2** 参照）

９）　誘導コイルの電源を入れる。箔の開き角が 60 度から 30 度になるまでの時間（半減時間 T_+）を測る。X 線の線量率にもよるが、通常は数秒から数百秒の間にある。箔がなかなか閉じない場合には、箔検電器をクルックス管に近づけてみる。それでも閉じない場合にはX線が出ていないと判断できる。（**4.2** 参照）

10）　箔検電器に負の電荷を荷電し、９）の測定を行い、半減時間 T_-を測る。（**4.3** 参照）

11）半減時間　$T=\sqrt{T_+ \times T_-}$　を計算し、X線の線量率 S を図 10 のグラフから読み取る。または　S=5. 47×10^4$T^{-1.45}$　で計算する。（**4. 3** 参照）

１．はじめに

図１　箔検電器の絶縁部分の掃除

先般､｢箔検電器によるクルックス管からのＸ線線量率の測定｣について述べた[1､2]が､測定操作の細かな点は省略した。しかし、電離箱などとは異なり、箔検電器のように陰極を持たない測定器は周囲の状況に非常に敏感でかなり注意をしないと妥当な結果を得ることが難しい。そこで、標記のように測定マニュアルを作成することにした。ここでは、まず、箔検電器について、次に誘導コイルについて述べ、誘導コイルの近傍で箔検電器を使用する際の注意点を述べる、最後にＸ線線量率の測定について述べる。なお､箔検電器を使った測定法は学校の先生自身で行なうことができる方法であるが、ガラス線量計などを使った方法も検討、実施されている[3]。

２．箔検電器の取扱い

2.1　箔検電器の掃除と角度目盛り紙の添付

箔検電器のガラスや電極の表面にほこりがかぶっているのを見かけることがあるが、きれいにするのがよい。特に電極とガラス部分との絶縁部分の掃除は大切である（図１）。

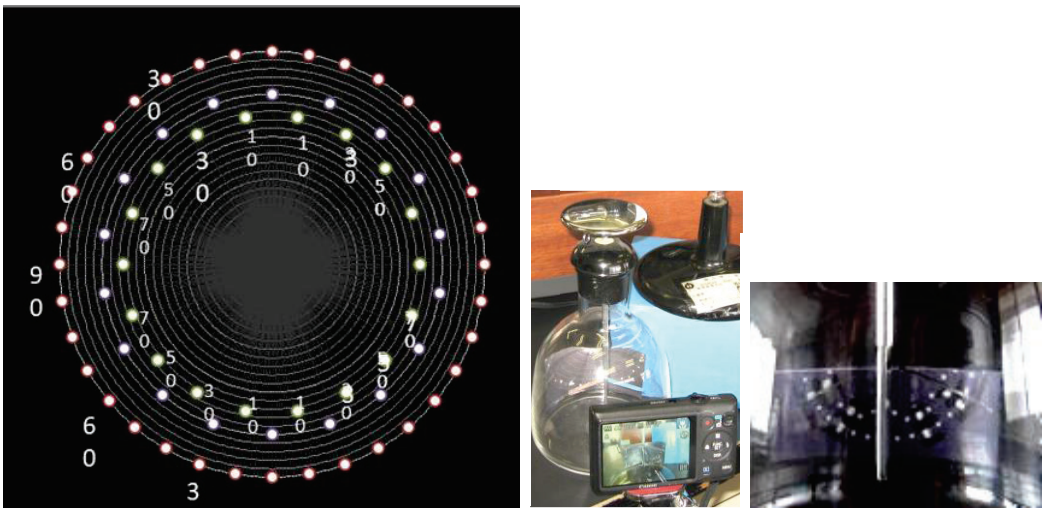


図２　ガラス表面に貼付ける目盛紙（左)、箔の開き角の読取り（中)、読み取り時の箔の動き（右)、右側の箔は約 67 度の開き角である。

ほこりがあると湿度が高い時には自然放電が大きくなる。また、使用中は時々、ガラス部分を手で覆って表面に溜まった電荷を逃がすことを勧める。

箔の開き角を読み取るために、角度目盛りをガラス表面に貼り付ける。図２の（左）に示す目盛紙をコピーして、半分に切り、視差をなくするために図２の（右）の図のように水平の視線で円の中心と箔の支持点を合わせることが大切である。箔の開き角の観測は、水平の視線で直接読み取るか、図２の（中）の図のように、デジタルカメラを通じて読み取ることで記録も可能である。

図３に各種の箔検電器の電極に外部から電圧を印加した場合の箔の開き角を示す。箔の重さや大きさによって異なる特性を示す。開き角と印加電圧の関係は、摩擦静電気で箔を開かせた場合も同じである。

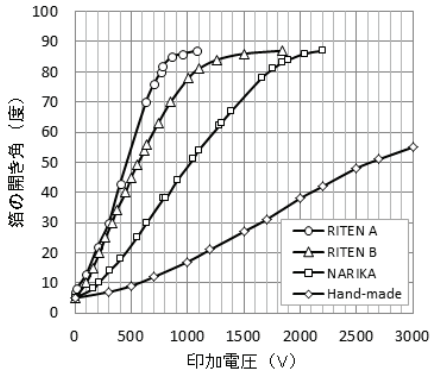


図３　各種の箔検電器の電極に印加した電圧と箔の開き角

2.2　箔検電器への正負の荷電方法

箔検電器への荷電方法はよく知られているので改めて述べる必要はないと思うが、筆者らが体得した方法を述べる。塩化ビニールのパイプ（塩ビパイプ）はホームセンターや通販で約¥200/m で購入できるので、普通のノコギリで約 30 cm に切る。フッ素化合物以外の物、例えば衣服などで塩ビパイプを摩擦すると負の電荷が塩ビパイプに発生する。

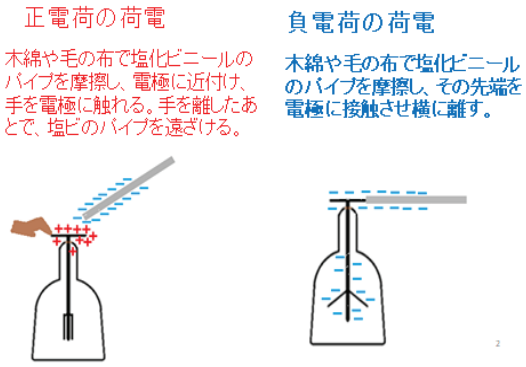


図４　箔検電器への静電気の荷電；左は正電荷の荷電、右は負電荷の荷電

箔検電器への正の電荷の荷電は図４の左に示すように、負の電荷が生じた塩ビパイプを箔検電器の上部に近づける。すると箔が開く。この状態で電極に手を触れると電極や箔の負電荷が手を通じて逃げ去り箔は閉じる。手を放した後、塩ビパイプを電極から遠ざけると電極に残っている正電荷のために箔は開く。正電荷が荷電されていることを確かめるには、負に荷電した塩ビパイプを近づけると箔の開き角が小さくなることで分かる。

箔検電器への負の電荷の荷電は図４の右に示すように、負の電荷が生じた塩ビパイプを箔検電器の上部に直接接触させると箔が開く。この状態で塩ビパイプを上部へ引き上げると負の電荷で箔が開いたままである。箔の開き角が 60 度以上にならなければ上記の動作を繰り返す。箔に負電荷が荷電されていることを確かめるには、負に荷電した塩ビパイプを近づけると箔の開き角が更に大きくなることで分かる。

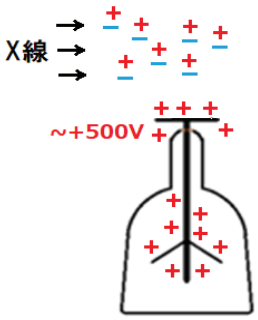


図５　箔検電器によるＸ線の線量率の測定原理

Ｘ線の線量率が低い場合（例えば 100μSv/h 以下）には、後述するように箔の開き角が 80 度あたりから読取り開始時間の 60 度になるまでに非常に時間がかかる。このような場合には、例えば A4 の紙をそのままでもよいが、適当な大きさに切り、紙の端を持って、他端を電極に軽く触れる。すると、箔は少し閉じる。この動作を適当に繰り返せば容易に開

き角を 60 度に近づけることができる。

３．測定室の環境など

3.1　測定室の環境

箔検電器でＸ線の線量率を測定する原理は、図５に示すように、Ｘ線が空気中に作った正負同量のイオンのうち、箔検電器に荷電された電荷（図では正の電荷）と反対の符合の電荷が箔検電器の電極の電位（図３に示すように個々の箔検電器によるが、開き角が 60 度程度では、通常、500～800 V）に引き寄せられて、電極の電荷を中和するために箔が閉じて行く現象を利用している。従って、この現象を乱す原因が周囲にあれば正確な測定は出来ない。この原因とその対策について次に述べる。

①　風などによる空気の動きがあれば、イオンが流されて測定に影響を及ぼすので部屋の窓を閉める。できれば換気扇を止める。あるいは排風口の近くを避ける。

②　Ｘ線以外によるイオンの発生をさせない。炎は大量のイオンを発生させる。従って、ガスストーブやガスバーナーを点けない。

③　箔検電器の周囲に、イオンの動きに影響を及ぼす高電位が無いようにする。例えば、誘導コイルからクルックス管への２本の導線のうち、陽極につながる正の高電位線は箔検電器から遠い位置に配置し、その線にできれば並行に陰極線につながる線を配置する。この問題は、後述するように、箔検電器に正の電荷を荷電した場合の箔が閉じる時間と、負の電荷を荷電した場合の時間を測ることで対処できる。

④　③と同じ理由で、箔検電器に荷電した塩ビパイプの荷電部分を手で拭って摩擦静電気を無くするか、塩ビパイプを箔検電器の近くに置かないようにする。摩擦静電気を有する塩ビパイプは数 10 kV の電位を有しているからである。

⑤　誘導コイルからのコロナ放電を無くする。この問題は重要なので次項に述べる。

3.2　誘導コイルからのコロナ放電

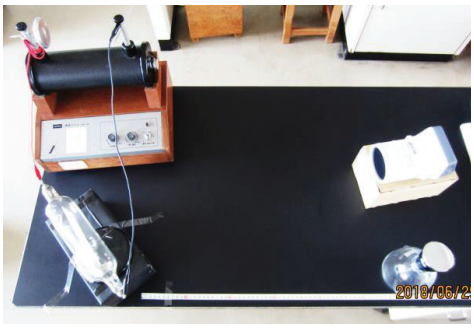
一般に、誘導コイルには、過電圧がクルックス管に印加されるのを防ぐために針状の電極がある。この電極と円盤電極の間に火花放電が生じている場合には極めて大量の正負のイオンが空気中に発生しているので、箔検電器は使用できない。このような火花放電が生じていなくても、針状の電極の先端からは目には見えないがコロナ放電が生じている。この状態も正負のイオン

図６　誘導コイルの針状電極の先端におけるコロナ放電を箔検電器で確認する（左）、誘導コイルの針状電極を取り外す（右）

を空気中に生じるので箔検電器を使用することはできない。従って、図６の（右）に示すように誘導コイルから針状の電極を取外すことが必要である。

目に見えないコロナ放電が箔検電器の箔を閉じさせる現象は、このこと自体がかなり教育的なので生徒の前で行うのが望ましいと思われる。図６の左に示すように、針状電極の先端から 20 cm 程度離して箔検電器を置く。箔検電器に正の電荷を荷電した状態で、針電極に正の電圧を印加しても箔は閉じない。箔検電器に負の電荷を荷電して針電極に正の電圧を印加すると箔はすぐに閉じる。針電極の表面近くで発生した正負のイオンのうち正のイオンが押し出されて（あるいは箔検電器の負の電位に引き寄せられて）箔検電器の負の電荷を中和するからである。また、箔検電器に負の電荷を荷電して針電極に正の電圧を印加すると箔はすぐに閉じる。箔検電器に負の電荷を荷電して針電極に負の電圧を印加すると箔は閉じない。針に負の高電位を印加して室内に負のイオンを発生させる機器は負イオン発生器（マイナスイオン発生器）として市販されている。

誘導コイルから針状の電極を取り除いた後も、誘導コイルの内部の放電でイオンが出てきていないかを箔検電器の箔が閉じないことで確かめることが大切である。



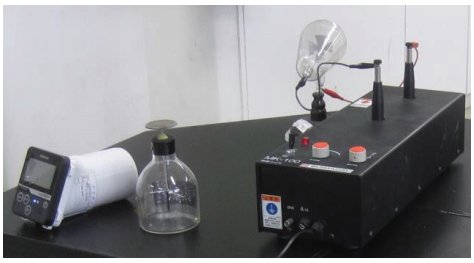


図７　上；電子線軌道表示型のクルックス管と箔検電器の配置、下；十字板入りのクルックス管の場合

４．Ｘ線の線量率の測定

4.1　測定のための配置

クルックス管からのＸ線は電子線が当たる物質から放出される制動Ｘ線が主である。クルックス管の構造がやや複雑なので、Ｘ線の強度（線量率）の方向分布は複雑である。電子が当たる物質の面に対向して 50~60 cm 離れた位置に箔検電器を置く。

蛍光板を有していて、電子の軌道を見るタイプのクルックス管は図８に示すように陽極スリットを陰極の方向からやや斜めに見た角度にＸ線が強く放出されている。従って、図８では箔検電器をスリットの中心から 50 cm の距離において図８の角度３の方向に置いた。しかしこれも少し角度が変われば線量率(μSv/h)は大いに異なる。電離箱の測定結果と比較する場合には、同じ位置に電離

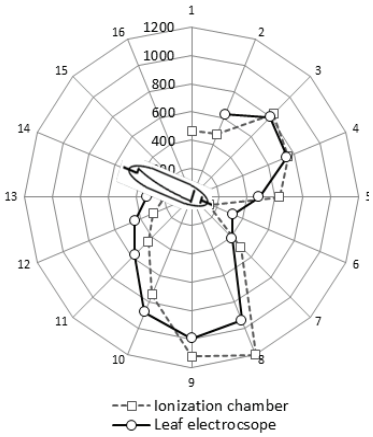


図８　電子軌道表示型のクルックス管から 50 cm の位置におけるＸ線線量率（μSv/h）

箱を置き、キャップを外して測定した。従って実質的に 70 μ m 線量率である。

十字板入りのクルックス管の場合には、十字板（陽極）を陰極から見る方向にX線が強く放出されている。しかしこれも方向が少し変われば線量率は大いに異なる。

4.2　箔検電器による測定における針状電極の取扱い

電子線の観測の実験では、針状の電極は安全上取り外してはならない。箔検電器による実験は、あくまでも針状の電極と円盤電極の距離がどの程度の時に実際にX線が発生しているかどうかを確かめることである。従って、まず電極の距離を 2 cm に設定する。電圧調節のつまみを動かしてスパーク放電が止むところでスイッチを切り、つまみの位置にマークを入れる。そして針状電極を取り外し（円盤電極にも針状のところがあれば円盤電極も取り外す）、箔検電器でX線が発生しているかどうかを箔が閉じるかどうかで調べる。5 分以上経過しても箔がほとんど動かなければX線は出ていないと判断できる。

装置によっては電極間の距離が 2 cm で電圧調節のつまみを最低にしてもスパーク放電をする機器がある。これは、針状電極の先端の曲率が小さすぎる場合(とがりすぎている場合)で、X線が出ていない場合が多い。しかし、場合によっては電圧調節のつまみを最低にしても、電圧が高く、スパークが起きている場合がある。この場合にはX線が出ている場合が多い。いずれの場合においても、針状電極を取り外し、箔検電器でX線が発生しているかどうかを調べる。X線が出ていれば 4.3 項で述べる方法で線量率を測定する。

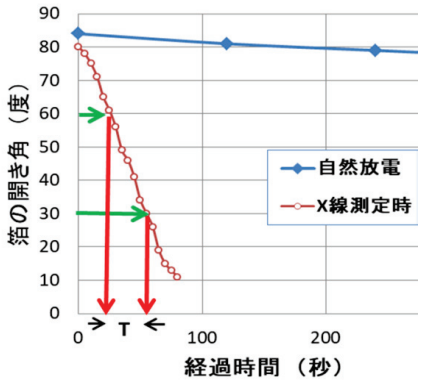


図 9　箔の開き角の半減時間 T

次に針状の電極を付け、2.5 cm あるいは 3 cm に設定し、2 cm の場合と同様の実験をする。X線が出ていれば 4.3 項で述べる方法で線量率を測定する。こうした実験を行なえば、その誘導コイルとクルックス管の組み合わせに置いて、どの距離なら（電圧調節つまみの位置がどこなら）どの程度の線量率のX線が発生するかを手持ちの箔検電器で分かる。

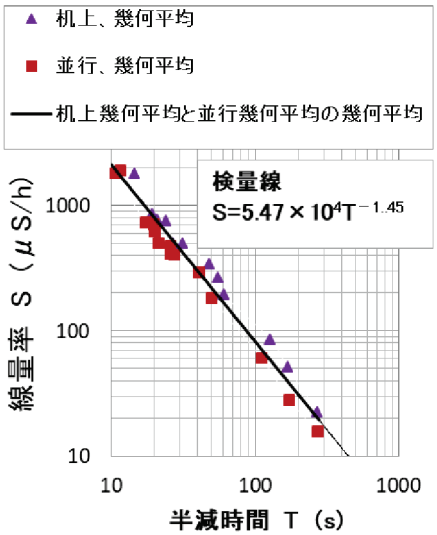


図 10　半減時間 Tから線量率 Sを求める検量線

繰り返すが生徒を前にした実際の電子線の実験においては針状の電極を取り外してはならない。近く、放射線教育関係者が結成している「教育現場などにおける低エネルギーX 線を対象と

した安全管理体制の確立プロジェクト」が、クルックス管を用いた電子線の実験において、針状電極を付けて実験をすること、およびその位置に関するガイドラインが発表される予定で、このガイドラインを守っていただきたい。今のところ針状電極と円盤電極の距離を２ cm に設定することが考慮されている。箔検電器による測定は、先生方自身で、誘導コイルのどのような設定の時にＸ線が発生しているかを確かめていただく実験である。

4.3　箔の開き角の半減時間 *T*の測定

箔検電器でＸ線の線量率を測る場合に、図９に示すように箔の開き角が 60 度から 30 度になるまでの時間を半減時間 *T*と定義して線量率の指標とした。線量率が低い場合には半減時間は 100 秒以上になることが多いので、箔検電器に荷電して箔が例えば 80 度に開いていれば、60 度になるまでの待ち時間が長い。そこで **2.2** で述べたように紙の先を箔検電器の電極に軽く触れて、60 度近くまで角度を小さくするとよい。

この状態にしてから誘導コイルの電源を入れ、図２、図９の要領で半減時間 *T*を測定する。ストップウォッチがあれば望ましい。箔検電器への荷電は正の電荷を荷電した場合の半減時間 T_+と、負の電荷を荷電した場合の半減時間 T_-の両方を測り、妥当な半減時間 *T* として、T_+と T_-の幾何平均値を採るのがよい。これは電極の配置の相違に伴う電位の影響などを相殺させるためである。*T*は、式(1)で求められる。

$$T = \sqrt{T_+ \times T_-} \qquad (1)$$

*T*が求まれば、Ｘ線の線量率 *S*（μSv/h)は図 10 の検量線から得られる。あるいは式(2)で得られる。

$$S = 5.47 \times 10^4 T^{-1.45} \qquad (2)$$

検量線の（式(2)の）誤差は±30％[2)]であるが、その後の実験では+50％、-30％が妥当ではないかと思われ、今後、式(2)を若干修正する必要があると考えている。

文献

１）森 千鶴夫、箔検電器による放射線の測定および他の理科実験、放射線教育、**22**、No.1, 3-12 (2018)

２）森 千鶴夫、緒方良至、秋吉優史、臼井俊哉、村上浩介、羽澄大介、中村嘉行、渡辺賢一、瓜谷 章、神谷 均、佐合 穣、宮川俊晴、田中隆一、掛布智久、森山正樹、箔検電器によるクルックス管からのＸ線の線量率測定、*Radioisotopes*, **69**, 1-12（2020）

３）秋吉優史、谷口良一、松浦寛人、宮丸広幸、他、クルックス管からの低エネルギーＸ線評価手法の開発、放射線化学、**106**, 31-38（2018）

「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、総説、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 ページ程度)

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。

解説(10 ページ程度)

放射線教育、エネルギー・環境、放射線及び原子力などに関する解説。

資料 (10 ページ程度)

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　→3.7×10^5 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】

今年初頭から世界中を騒がせているのは、新型コロナウィルスによる肺炎の流行である。WHO は、ついにパンデミックになっていると宣言した。東京オリンピックの開催も危ぶまれている。現時点で、新型コロナウィルスに汚染されていないのは、南極大陸だけだそうだ。そこで思い出されるのが 1964 年に発刊された小松左京の長編小説「復活の日」である。映画化もされた。新種のウィルスが、瞬く間に世界的に流行することを題材とした SF 小説である。生物兵器として研究されていたウィルスが盗まれ、その運搬に用いられていた飛行機がアルプスの山中で墜落、雪解けとともにウィルスが世界中に拡散する。有効な薬はない... 南極大陸にいた越冬隊員達のみが生き残る...。SF であり、誇張はある。しかし、今回の新型コロナウィルスの流行を目の当たりにし、あたらずしも遠からず、作者の予見に舌を巻く。

さて、ウィルスは目に見えない、感染しているか否かは、専門の機関で熟練した専門家による分析が必要で、結果が出るまで時間を要する。方や、目に見えない、五感に感じなことで嫌われがちなのが「放射線」である。しかし、放射線は、ヒトに害をもたらすほどの量であれば、小型のサーベイメータで瞬時に検出可能である。さほど難しくない機械の使い方さえ教われば、誰でも測定できる。RI（ラジオアイソトープ）講習のときなどに述べているのが「私は、放射線よりウィルスや細菌などの方がよっぽどこわい。」

何事も「おそれず、あなどらず」「知彼知己，百戦不殆（彼を知り己を知れば百戦殆からず)」。本誌で、森氏が書かれているようにクルックス管からの漏洩 X 線に関し、その線量は、身近にある箔検電器で測定可能であり、秋吉氏が解説されているように適切な管理がなされていれば、安心して生徒の前で実演できる。また、柴田氏は、X 線の発見が、如何に原子構造の解明の糸口となったか、そして科学の進歩に役立ったか、を分かりやすく解説されている。レントゲンがX線を発見した翌年(1896 年)には、日本でも数グループがX線写真の撮影に成功している。一方、同じ年、アメリカでは、医療用 X 線検査で被曝による障害も発生している。工藤氏の解説は、幾分難しい内容であるが、日本で発見されたニホニウム(Nh)に関するエピソードおよび他の新元素の発見に関する興味深い内容である。ニホニウムに関する蘊蓄を話すのに恰好の材料である。

本巻に載せた解説・資料が教育現場の教員ばかりでなく、放射線教育に関心を持つ人に少しでも資することができれば幸いである。

「放射線教育」、「ニュースレター」の充実には会員各位の協力が不可欠である。会員各位の積極的な投稿を切に願う。 (緒方良至)

放射線教育　Vol. 23, No. 1 (2019)

発行日：　2020 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：　緒方良至（委員長）、柴田誠一(副委員長)、岩崎民子、大野新一、
大森佐與子、工藤博司、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
2019 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 2018・2019 年度名簿	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	4
5. 2019 年度教育課程検討委員会活動報告	6
6. 第 66 回全国中学校理科教育研究会秋田大会出展報告	8
7. 日本エネルギー環境教育学会第 14 回全国大会参加報告	10

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、放射能、原子力の専門家および学校教員の有志により構成されるボランタリー組織である。1994 年４月に設立し、今年で 26 年目を迎えた。2000 年 11 月に NPO 法人の認証を受けた

2011 年に発生した東京電力福島第一原子力発電所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、そのことが原子力エネルギーに対す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・技術の進歩で恩恵を受けている一方で、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・高等学校の教育において、放射線・放射能・原子力・エネルギー環境問題に関する正しい理解が啓発・推進されるように、学習指導要領などの教育政策を改善し、意欲のある教員を育成することに重点を置いて、勉強会、パネル討論会及び国際シンポジウムを企画・開催している。またいくつかの専門委員会を設けてそれぞれの諸課題を検討し、それをもとに文部科学省はじめ関係当局に政策提言を行なうなどの活動を行なっている。

当フォーラムの会員数は、2019 年 10 月現在で個人正会員数 109 名,団体正会員数 27 である。福島原発事故発生以後における原子力事業関係団体の団体会員の退会が急増している。当フォーラムにとっては、団体会員の減少が直接財政の収支に影響を及ぼし、フォーラムの運営・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。このような財政的基盤改善の確立を図るためにも団体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、なにを置いても個人正会員ならびに団体会員の増強が重要である。

今年度のフォーラムの定常的な活動として第１回勉強会を６月および第２回勉強会を３月に東京慈恵会医科大学において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で開催した。いずれの会も参加者に好評であった。

専門委員会活動については、「教育課程検討委員会」を今年度は 3 回開催し、クルックス管実験による放射線授業を目指して、クルックス管の安全な取り扱いなどの検討を行なった。なお、2020 年 3 月 1 日(日)に開催を予定していた令和元年度放射線教育フォーラム第 3 回勉強会は、開催時点で新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染が国内で拡大する事態を受けて、参加者および講演者を含む関係者の安全・安心に考慮し開催を取りやめた。

フォーラム運営のための会合は、通常総会として年１回、東京慈恵会医科大学で開催した。理事会の開催は３回、フォーラム事務所で開催した。フォーラムの円滑な運営を図るために、事務連絡会議を毎月１回開催した。

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」Vo;l.23,No.1 を発行し、今年度の活動報告及び活動に関わる参考資料を後付けとした。今年度も刊行物経費節減のために、「放射線教育」誌と「年度末報告書」を合冊して刊行することとした。また、ニュースレターを毎年３回（6 月、11 月、3 月）発行し、今年度末の号数は７６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.re.f.or.jp）に掲載されている。トップページには主な情報分類として、「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」「GREETINGS IN ENGLISH」など 6 項目を編集し配置した。

２．ＮＰＯ法人放射線教育フォーラムの 2018・2019 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）
朝倉　正（東京慈恵会医科大学教授）
大森佐與子（元大妻女子大学教授）
緒方良至（名古屋大学アイソトープ総合センター）
小高正敬（元東京工業大学助教授）
酒井一夫（東京医療保健大学教授）
柴田誠一（京都大学名誉教授）
畠山正恒（聖光学院中学・高等学校教諭）
細渕安弘（元東京都立保健科学大学助教授）
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･高等学校教諭）

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：石井正則、大津浩一、大野和子、菊池文誠、岸川俊明、熊野善介、小林泰彦、下道国、関根勉、鶴田隆雄、林壮一、坂内忠明、広井禎、古田雅一、宮川俊晴、村石幸正、若杉和彦

顧　　問：荒谷美智、大野新一、金子正人、河村正一、工藤和彦、黒杭清治、黄金旺、野崎正、森千鶴夫、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

２０１９年

４月１２日（金）第１回事務連絡会議　（フォーラム事務所、７名）

４月２２日（月）第１回編集委員会　（フォーラム事務所、８名）

５月１０日（月）第２回事務連絡会議　（フォーラム事務所、７名）

５月１９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２日（日）第１回理事会　（フォーラム事務所、１１名）

６月１６日（日）通常総会　（東京慈恵会医科大学、委任状含む出席者８８名）

６月１６日（日）第１回勉強会　（東京慈恵会医科大学、５１名）

（勉強会プログラム）

講演　小中学校の国語･社会の教科書における「放射線」の記述
林　壮一　福岡大学理学部物理科学科 准教授

講演　教職課程･理科教育を担当して
村石　幸正　中央大学理工学部 特任教授

講演　生活科学としての放射線利用の学習　― 農業や食の安全と食品照射 ―
小林　泰彦　量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所

講演　福島の過去に学び、現実を見つめ、未来を切り拓く
― コミュタン福島における放射線教育 ―
佐々木　清　コミュタン福島教育ディレクター

６月２１日（金）第３回事務連絡会議　（フォーラム事務所、６名）

９月６日（金）第４回事務連絡会議　（フォーラム事務所、８名）

１０月１１日（金）第５回事務連絡会議　（フォーラム事務所、６名）

１１月１５日（金）第６回事務連絡会議　（フォーラム事務所、６名）

１１月２４日（日）第２回勉強会　（東京慈恵会医科大学、３１名）

講演　Ｘ線発見から原子構造の解明へ
―クルックス管による放電研究がもたらした現代科学の基礎―
柴田　誠一　放射線教育フォーラム

講演　クルックス管プロジェクト第二期実態調査による暫定ガイドライン実効性の検証
結果報告　―生徒、教員の安全確保のために―
秋吉　優史　大阪府立大学放射線研究センター

講演　放射線・原子力の教育現場での課題　―教員とシニアの対話会から―
若杉　和彦　日本原子力学会シニアネットワーク連絡会

講演　トリチウム水問題の解決を阻むもの ―福島の復興に向けて―
河田　東海夫　元日本原子力発電環境整備機構理事

１２月５日（日）第２回教育課程検討委員会　（フォーラム事務所、５名）

２０２０年

１月１９日（日）第７回事務連絡会議　（フォーラム事務所、６名）

１月１９日（日）第２回理事会　（フォーラム事務所、１１名）

２月９日（日）第３回教育課程検討委員会　（フォーラム事務所、４名）

２月２１日（金）第７回事務連絡会議　（フォーラム事務所、６名）

３月１日（日）第３回勉強会（新型コロナウィルス肺炎が感染拡大する事態を受けて中止）

4.「放射線教育誌」およびニュースレターの発行

4．1「放射線教育誌」2018 Vol.22, No.1

【巻頭言】 5G 導入と高周波電磁波の健康への影響
山寺 秀雄（名古屋大学名誉教授）

【解説】 X 線発見から原子構造の解明へ
－クルックス管による放電研究がもたらした現代科学の基礎－
柴田　誠一（放射線教育フォーラム）

【解説】 原子をつくる：人工元素物語　工藤 博司（東北大学大学名誉教授）

【解説】 学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用
秋吉 優史(大阪府立大学)

【資料】 箔検電器によるクルックス管からのX線線量率の測定マニュアル
森 千鶴夫（名古屋大学名誉教授）

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方

編集後記　緒方 良至（名古屋大学）

4．2 ニュースレター

ニュースレター No.74 2019.6

巻頭言　学習指導要領は変わるけれど　畠山正恒（聖光学院中学校高等学校）

化学の目で見た物理と放射線　渡部 智博（立教新座中学校・高等学校）

看護職に対する放射線教育　酒井 一夫（東京医療保健大学）

次世代のための効果的なエネルギー教育をめざして － エネルギーリテラシー研究報告 －
秋津 裕(エネルギーリテラシー研究所)

クルックス管プロジェクトの現状と課題　秋吉 優史(大阪府立大学)

通常総会及び第1回勉強会案内　放射線教育フォーラム

第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会における放射線教育に関わる公開パネル討論の案内
放射線教育フォーラム

「第 6 回放射線教育に関する国際シンポジウム」（ISRE2020) 開催の報告
長谷川圀彦（放射線教育フォーラム）

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　堀内公子（放射線教育フォーラム）

ニュースレター No.75 2019.11

巻頭言 英語教育と大学入学共通テスト　工藤 博司（東北大学大学名誉教授）

放射線教育「学びたいこと・学ばせたいこと」　青木久美子(区立千歳中学校)

小中学校の国語・社会の教科書における「放射線」の記述
林 壮一(福岡大学)

教職課程・理科教育法を担当して　村石 幸正(中央大学)

農業や食の安全と食品照射 ～生活科学としての放射線利用の学習のために～
小林 泰彦(量子化学技術研究所)
福島の過去に学び、現実を見つめ、未来を切り拓く コミュタン福島の放射線教育
佐々木 清(福島県環境創造センター)
令和元年度第 2 回放射線教育フォーラム勉強会案内
第 56 回アイソトープ放射線研究発表会 放射線教育フォーラム
公開パネル討論「クルックス管を活用した中学校理科の放射線
授業の展開－科学史から学ぶ放射線授業を目指して－」報告
宮川 俊晴(放射線教育フォーラム)
「第 6 回放射線教育に関する国際シンポジウム」(ISRE2020) 開催準備状況報告（2 回目）
長谷川圀彦（放射線教育フォーラム）
日本エネルギー環境教育学会第 14 回全国大会
「自然との共生を目指すエネルギー環境教育」参加報告 宮川 俊晴(放射線教育フォーラム)
第 66 回全国中学校理科教育研究会秋田大会報告
田中 隆一、辻 萬亀雄(放射線教育フォーラム)
令和元年総会報告資料 (活動計画書、財産目録、賃貸対照表)
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 工藤 博司（東北大学大学名誉教授）

ニュースレター No.76 2020.3

巻頭言 放射線教育―看護職への展開 酒井一夫(東京医療保健大学)
X 線発見から原子構造の解明へ －クルックス管による放電現象の研究－
柴田誠一(放射線教育フォーラム)
クルックス管プロジェクト第二期実態調査による暫定ガイドライン
実効性の検証結果報告 ～生徒、教員の安全確保に向けて～
秋吉 優史(大阪府立大学)
放射線・原子力の教育現場での課題 ～教員とシニアの対話会から～
若杉 和彦(日本原子力学会シニアネットワーク連絡会)
令和元年度放射線教育フォーラム第 3 回勉強会案内 放射線教育フォーラム
〔書評〕空気と水と放射線 切ろうにも切れない放射線との関係 下道國著
緒方良至(名古屋大学)
団体会員への謝辞 長谷川圀彦(放射線教育フォーラム)
令和2年度・3年度NPO法人放射線教育フォーラム役員等選挙について
放射線教育フォーラム選挙管理委員会
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 細渕安弘(放射線教育フォーラム)

５．2019 年度教育課程検討委員会活動記録

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(2019 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中・高校特任教諭
　同　　田中　隆一　　元日本原子力研究所高崎研究所長
　同　　舩田　優　　東洋大学京北中学高等学校講師
　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
客　員　宮川　俊晴　　元日本原燃㈱安全本部 副本部長

３．活動経過と成果

（１）2017 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⑵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

2017 年度　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」

2018 年度　同上の継続　及び教育出版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）2019 年度の目標と活動

⑵-1　目標

①教科書会社との意見交換会：啓林館に要望書を提出し開催する。
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』は引き続き継続するが、本年度までに行ってきた教科書会社ごとの記述検討ではなく、高校生のための放射線リテラシー育成を目指すため、従来とは別の形で実施する。
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」(担当　大津委

員）「素粒子の探査で宇宙の謎に迫る」「見えない放射線を見える化する」を完成し、ホームページに掲載する。①「物理基礎」の放射線に関わる記述検討の継続。②化学の目で見た物理　③PPT 教材の継続制作　④啓林館との意見交換会の実施

⑵-2　2019 年度教育課程検討委員会の活動内容

教育課程検討委員会を下記の日の 13:00～16:00 に事務所で３回開いた。

　当委員会の最終目標である「発達段階に応じた放射線リテラシー」作成を目指し、本年度は「高校生の放射線リテラシー」としての「透過と電離作用」に絞って検討する。

⑵-3　活動

第１回　2019 年 5 月 19 日（日）勉強会の報告と予告が中心になった。

『化学の目で見た物理と放射線』2018 年度第 3 回勉強会講演を終えて（渡部）

講演概要：化学と物理の接点に原子がある。▼元素記号を化学では核外電子まで含めるが、物理では原子核のみに注目する。無視はしていない。▼気体の状態方程式：化学は P,ℓ,K で表すが物理では　J／K・mol。▼化学と物理で電離、臨界などが異なる内容で扱われる。▼物理選択者と化学選択者を指導する場合に注意を要する。

『教職課程・理科教育法を担当して』（村石）2019 年度第 1 回勉強会講演２要旨

講演予定の要旨：教員免許：平成 21 年 4 月 1 日から教員免許更新制が導入▼駅弁大学（地方国立大学）の今後の運営では優秀な学生の確保に苦慮▼文科省からの助成金減額に伴う大学運営で産学共同や二大学の法人統合などが考えられる、など

第２回　2019 年 12 月 8 日（日）高校生の放射線リテラシー育成[透過と電離]の検討

▼黒杭が準備したスライド「透過と電離」「放射線照射による化学反応・生物反応」に田中氏から出された意見（別紙）をもとにして検討した。▼意見の一例：「透過」について生徒からの「遮蔽された放射線はどうなるの」という素朴な質問に答えるため「α 線はヘリウム原子（気体）になって昇天する」というスライドを作成したが「昇天」と言う表現は好ましくない。1 原子のみでは三態の区別はない。「β 線が金属原子に衝突すると内核電子と置き換わったり、自由電子になって取り込まれたりする」というスライドの説明については、電子との衝突だけを考えればよいような比較的に高い電子エネルギーの領域では、物質の単位重さあたりのβ線によるエネルギー損失は物質の電子密度で決まり、その化学結合には因らないという意見をもとに削除された。▼「電離」を示す動画で、入射する放射線が電磁波として描かれ、電磁波が原子内電子に衝突して電離を起こすと誤解されるので、放射線は電子として扱うのが適切と言う意見があったが、スライド画面に“放射線”と入れてあり、作り直しは困難▼その他、提出された意見に従って修正しながら「透過と電離」の 1 本にまとめることになった。

第３回　2020 年 2 月 9 日（日）

▼第 2 回委員会を受けて演題を上記に改め、現在作成中の講演スライドの説明では、ＤＮＡに関する科学的な理解をベースに、自然進化、突然変異育種、ゲノム編集作物、ガンなどのキーワードの理解を深めることで、われわれが放射線を怖がるわけの正しい理解につなげる内容が説明された。▼放射線の生物影響に関する放射線教育としては、これまでにない新鮮で意欲的な内容が盛り込まれており、勉強会に向けて活発な意見交換がなされた。▼説明に多用されているＤＮＡ等の生物基礎に関する言葉遣いは、高校生物の科目で使用されている言葉遣いと整合するように配慮するのは望ましいとの意見が出された。

▼質疑応答を含めて５０分の講演としては内容が豊富過ぎるので、スライド数を含めて発表内容をコンパクトに収めるべきであるとの意見も出された。

本年度の目標が達せられなかった事項

啓林館との意見交換会：来年度は中学校理科教科書の改訂版が出され、その検討に入るので、現在の教科書についての意見交換会は中止にする。

未完成の PPT 教材：本年度に完成できないものは廃棄にする。

（３）教育課程検討委員会の解散及び 2020 年度の教育課程の関わる取り組みについて

　黒杭清治氏は今年度末で本委員会の委員長を退任した。これに伴って教育課程検討委員会を解散する。来年度はじめに公開される中学校新理科教科書の放射線に関わる記述の調査のため、理事会の諮問を受けて作業するグループの形成を検討中である。

６．第 66 回全国中学校理科教育研究会秋田大会出展報告

2019 年 8 月 8〜9 日に秋田市のアトリオンビルで開催された第 66 回全国中学校理科教育研究会秋田大会におけるブース出展に参加した。当フォーラムとしては、第 62 回以来 5 度目の参加である。

今回の出展は昨年の兵庫大会と同様に、当フォーラムの企画をもとに、2 年前に制作された放射線 DVD 教材『R の正体』を参加者に配布、展示し、関心を示した大会参加者の先生方に手渡すとともに、放射線授業への活用の意義を強調した。

また、今回は東北地域で放射線教育支援を進めている東北放射線科学センターに協力を呼びかけ、ブースを並設して中学校における放射線授業推進に向けた出展協力を行った。

１．大会の概要

大会主題は「自然と社会との調和を目指し、未来を創造する力をはぐくむ理科教育」。インターネットなどの技術革新で情報化が進み、人々の関わり方だけでなく社会構造も変化する一方、大雨による河川の氾濫や台風や地震などの大規模な自然災害も多発し、将来予測が難しくなりつつある。これらを踏まえ、自然の事物・現象に関わり、理科の見方・考え方を働かせ、見通しをもった観察・実験を通して科学的に探究するために必要な資質・能力の育成を目指している。

5 つの分科会でそれぞれ各地域から選ばれた 5 件の研究報告と質疑、文部科学省主任視学官の講演などがあった。参加者数は 450 名とのこと。

２．ブース出展の概要

本大会の出展数は理科教材企業、教科書会社、公益法人など 22 件。放射線教育に関わる出展は、当フォーラム、東北放射線科学センター、日本原子力産業協会、大阪府立大学の 4 件。

出展スペースが大会参加者の主動線上に設営されていなかったので、昨年度の兵庫大会のように、多数の参加者とコミュニケーションを取りにくかったのが難点。

併設出展のご協力をいただいた東北放射線科学センターからは、身のまわりの放射線を確認する「ベータちゃん」による実験、放射線測定キットを使った実験などが展示された。

３．放射線 DVD 教材の出展結果

付属資料を含む放射線 DVD 教材一式を前もって大会本部に郵送することで、大会参加受付時の配布資料として 200 部を大会参加者に手渡すことができた。昨年の出展では放射線 DVD 教材の映像を展示できなかったが、今回は東北放射線科学センターのご厚意で DVD モニターをお借りし、映像をお見せしながら、先生方とコミュニケーションをとることができた。そのなかで、郵送した配布資料とは別に、持参した 80 部をご理解いただいたうえで手渡すことができた。

昨年度、全国の中学校に一斉配布された放射線 DVD 教材が教育現場で役立っているのか知りたいと思っていたが、会場で出会った教員の殆どが同教材のことを認知していることが確認できた。今回も全国から参加した多くの理科教員と直に会って話ができる絶好のチャンスとなった。

４．出展参加者

出展は当フォーラム事務局の田中隆一、辻萬亀雄が担当。二人で対応したので、多くの参加者とコミュニケーションをとったうえで、同教材一式を効率的に手渡せた。

５．講演会及び分科会の概要

文部科学省講演では、初等中等教育局の教科調査官の遠山一郎氏が「理科教育で育成を目指す資質・能力について」をテーマに、学校内に閉じられた知識伝達型の教育に代わる「社会に開かれた教育課程」として、①何を理解し何をできるか、②理解していること、できることをどう使うか、③どのように社会と関わり、よい人生を送るかの教科横断的な「三つの柱」が強調された。高校１年の７月の段階で文系、理系の選択が生徒一人一人に迫られる実態を考えれば、その重要性は明らか。分科会は放射線教育でいま重視されている観察・実験をテーマとする第３分科会に参加。

６．今後に向けて

来年度の第67回大会は九州の福岡市での開催が予定されている。この大会は中学校理科教員にとっては最大の催しである。放射線教育フォーラムの存在を広く知っていただくとともに、関心をもつ理科教員、教科書会社や多くの教材関係者の方々と意見交換できる絶好のチャンスである。今後とも出展参加を継続していきたいと考える。

田中　隆一、辻　萬亀雄

７．日本エネルギー環境教育学会第 14 回全国大会
「自然との共生を目指すエネルギー環境教育」
参加報告

概要

掲題の全国大会は、２０１９年８月５日（月）～７日（水）の期間、高知工科大学永国寺キャンパス（高知市内）で開催された。今大会の趣旨はサブタイトルをキーワードに日本と世界のエネルギー環境について考える機会として地域色豊かな内容だった。

初日８月５日には研究教育棟で、徳山英一氏（高知大学海洋コア総合研究所長）による特別講演「深海底資源にめぐまれた日本―メタンハイドレードの資源探索」が行われ、同研究所が取り組んでいる海洋コア（深海掘削船「ちきゅう」などが海底から採取した連続柱状試料）を用いた基礎解析から応用研究として日本近海のメタンハイドレードの状況やそのメカニズムなどが紹介された。また、シンポジウム「自然との共生を目指すエネルギー環境教育」の基調講演では。永野正展氏（高知工科大学地域連携機構）による「枯れない資源、木質バイオマス―地域資源を地域に活かす」として高知大学での再生可能エネルギーの取り組みとして山林の手入れから得た木材燃料や発電施設の運営管理の現状が紹介された。

大会の一般発表やワークショップは、地域連携棟の２階の６会場の講義室で開催され、企画セッションの里山工学の創生や授業実践、教材開発、普及活動、調査・評価の各セッションに分かれて活発な発表と討議が行われた。8 月 7 日は、見学会が開催された。

会場について

大会の一般発表やワークショップは、地域連携棟の 2 階のワンフロアで行われたことから会場間の移動がとても便利であった。

展示ブースについて

NPO 法人放射線教育フォーラムが参加した展示会場は、東京書籍と啓林館の教科書会社 2 社以外に 7 機関が出展していたが、同じ地域連携棟の 2 階の受付に隣接して設けられていたことから多くの来場者があった。当フォーラムのブースでは、DVD「R の正体」、放射線教育誌及びニューズレターの配布を行い、発表で来場された清風南海高校の生徒約 10 名が持ち帰った他、準備した 50 部のうち 40 部強が不在時の自由持ち帰りされた。残部は大会実行委員長の高知大学八田章光氏に託した。また大阪府立大学の秋吉優史氏のペルチエ式霧箱展示と幸浩子氏のエネルギーEEE の出前授業パンフレットも配布し放射線教育の理解・普及活動に努めた。　（宮川俊晴）

放射線教育フォーラム
2019 年度活動に関わる参考資料

頁

第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会*におけるパネル討論
「クルックス管を活用した中学校理科の放射線授業の展開」の話題提供要旨

1. 教育現場における放射線安全管理体制の確立に向けた活動の紹介（秋吉優史） 1
2. 放射縁教育と中学校におけるクルックス管を使った授業（小鍛治優） 3
3. 箔検電器に因るクルックス管からのＸ線の測定（森千鶴夫） 4
4. 理科実験向け冷陰極式クルックス管のＸ線発生に関する安全の取り組み（若松巧倫） 6

第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会*におけるクルックス管実験に関わる口頭発表要旨

1. 箔検電器に因るクルックス管からのＸ線の測定（Ⅱ）（森千鶴夫、他） 7
2. クルックス管誘導コイルのパルス電界による炎や箔の振動（森千鶴夫、他） 8
3. 電子線に着目したクルックス管観察の学習展開を考える（田中隆一） 9

放射線教育フォーラムニュースレターからの転載

1. 化学の目で見た物理と放射線 （渡部智博） 10
放射線教育フォーラムニュースレターNo.74
2. 小中学校の国語･社会の教科書における｢放射線｣の記述 （林壮一） 12
放射線教育フォーラムニュースレターNo.75
3. 福島の過去に学び、現実を見つめ、未来を切り拓くコミュタン福島の放射線教育（佐々木清） 14
放射線教育フォーラムニュースレターNo.75
4. Ｘ線発見から原子構造の解明へ（柴田誠一） 16
放射線教育フォーラムニュースレターNo.76

＊ 日本アイソトープ協会の主催により 7 月 3－5 日に東京大学弥生講堂で開催された

パネル討論 2(1)

教育現場における放射線安全管理体制の確立に向けた活動の紹介
Introduction of activity towards establishment of the radiation safety management system in education fields

大阪府立大学 研究推進機構 放射線研究センター[*1]　　○秋吉　優史[*1]
(AKIYOSHI, Masafumi[*1])

１．はじめに

中学校理科での電子・電流に関する単元に於いて、現行の学習指導要領に於いてもクルックス管による電子線の観察が謳われている。さらに、H29 年に公示された新学習指導要領に於いては、真空放電と関連づけながら放射線の性質と利用にも触れることが新たに追加されている。当該単元は 2 年生で取り扱われ、全ての生徒が放射線について学習することになるため極めて画期的なことである。しかしながらクルックス管から X 線が放出されることはレントゲンはじめて X 線を発見したときから知られていることである。一部にはエネルギーは低いが 5cm での 70μm 線量当量(身体の表面での線量)が 250mSv/h という高い強度の X 線を放出する製品が存在することがこれまでに報告されている[1]。特に近年水晶体に対する放射線影響が高い注目を集めており、線源を見つめるという特性を持つクルックス管では特に注意を要する。

２．低エネルギーX 線の測定

クルックス管から放出される X 線は 20keV 程度とエネルギーが低く、一般的なサーベイメータでは(放射線管理の現場で信頼されている NaI シンチレーションサーベイメータも含む)エネルギーが低すぎて正常な線量測定が不可能である一方で、人体中 1cm で半分程度にしか減衰せず、α線、β線の外部被ばくと異なり全身への被ばくによる実効線量は無視する事が出来ないが、これまでに正確に実効線量・等価線量評価を行うモデルは得られていない。また一般的な放射線源と異なりパルス状に X 線が放出されるため、専門家でもその測定・評価は困難であるが、これまでに積算型の固体線量計や電離箱などによる電流モードでの測定により信頼できる計測が行えることを確認してきた[2]。

研究室レベルでの測定に加えて実際の教育現場での実態調査のために、個人線量計として一般に用いられている蛍光ガラス線量計を郵送し、以下に示す暫定ガイドラインを遵守しての測定後、返送してもらうことで広く全国の調査を行っている(調査を希望する学校は秋吉: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp まで連絡)。

暫定ガイドラインを策定する前の、普段授業を行っている時の設定で行った調査では、15cm での 70μm 線量当量が 195mSv/h にも達する例があり、不注意な取扱いにより大きな線量を被ばくする恐れがある事が明らかになった。その一方で約半数のクルックス管については、最も近い 15cm の距離で 10 分間の測定でも、検出限界(50μSv)以下であった。 運用条件を確認し、研究室レベルでの測定結果と併せて検証することで、次に示すようなクルックス管からの X 線被ばく量低減のための運用ガイドラインを提案している。

３．安全管理体制の確立

生徒や教員は放射線業務従事者ではなく、我が国の法体系には ICRP1990/2007 年勧告での一般公衆に対する線量限度が取込まれていないため被ばくの規制が行われておらず、放射線安全管理上慎重な検討が必要である。このため、全国の放射線計測、線量評価の専門家、放射線教育関係者と実際の教育現場の先生方の協力を得て「クルックス管プロジェクト」[3] を立ち上げ、自主的な安全管理体制の構築を行っている。

現在既にクルックス管を教育に利用している現場に於いて存在している被ばくを、出来る限り低減するためには放射線防護の観点から以下の対策が必要となる。

1) 印加する電圧を下げる
2) 流れる電流を下げる
3) 距離を取る
4) 遮蔽をする
5) 時間を短くする

発生するX線の線量自体を下げる

放射線防護の3原則

実際にどの程度の値にすればよいかという指標を得るために、バッジ状の固体線量計を全国 19 校の学校に郵送し、実際の教育現場での実態調査を行った。2018 年度はこれまでに授業を行なっていた条件での測定を依頼したが、37 本中 18 本のクルックス管で、距離 15cm でも検出限界(50μSv)未満であった。1m の距離、10 分間の実演で 70μm 線量当量が 50μSv を超える物は 12 本だけであり、うち 2 本は意図的に最大電圧での測定であった。一校だけ、放電出力を最低としているのにもかかわらず、1m・10 分で 600μSv にも達した装置が存在したため追加調査を行った。その結果、放電極の距離が 50mm の時は 30cm の距離で 30mSv/h にも達したが、30mm では 2mSv/h, 20mm では 40μSv/h にまで落とすことが出来た(1m・10 分では 0.6μSv に過ぎず実態調査の際の 1/1000 にまで低減できた。いずれも 70μm 線量当量で実効線量はさらに 1/10 程度と見積られている)。これらの、これまでに得られた知見から暫定ガイドラインとして以下の運用方針を提唱している。

・誘導コイルの放電出力は電子線の観察が出来る範囲で最低に設定する
・放電極を絶対に使用し、放電極距離は 20mm 以下とする。
・出来る限り距離を取り生徒への距離は 1m 以上とする。磁石で電子線を曲げるときは指し棒などを使用する。
・演示時間は 10 分程度に抑える

これらの条件を守ることで、1 回の実験あたりの実効線量は 10μSv にも満たなくなると見積られており、神奈川県と岐阜県の自然放射線量の差年間 380μSv や、国際線の飛行機での移動の際の 1 回 100μSv 程度よりもはるかに少なく、国内線の飛行機による移動を数回したのと同程度の線量に収まる。しかしながら全国には我々の予想もしないような装置が存在する可能性があるため、是非全国調査に御協力願いたい。

[1] クルックス管から漏洩するX線の実態とその対策, 大森儀郎, 神奈川児立教育センター研究集録, 13(1994)21-24.
[2] クルックス管からの低エネルギーX 線評価手法の開発, 秋吉 優史, 谷口 良一, 松浦 寛人, 宮丸 広幸, Do Duy Khiem, 神野 郁夫, 濱口拓, 野村 貴美, 谷口 和史, 小林 育夫, 川島 紀子, 佐藤 深, 森山 正樹, 宮川 俊晴, 放射線化学, 106 (2018) 31-38.
[3] http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works

*1 Radiation Research Center, Osaka Prefecture University

パネル討論 2(2)

放射線教育と中学校におけるクルックス管を使った授業

Radiation education and classes using Crookes tube in junior high school

永平寺町志比北小学校[*1]　　○小鍜治　優[*1]
(KOKAJI, Masaru[*1])

１．はじめに

平成20年3月改訂の中学校学習指導要領理科第一分野の内容、(7)科学技術と人間、エネルギー資源に関わる「内容の取扱い」の中で「放射線の性質と利用にも触れること」という記述が加わった。これは、1977年の改訂で削除されて以来、約30年ぶりに放射線についての学習が復活することを意味した。この時点で、約30年ぶりということは、「原子の構造」や「放射線」を学んでいない・指導していない教員が多くいることを意味した。それから約10年、平成29年度7月告示の次期学習指導要領では、(3)電流とその利用で、「真空放電と関連づけながら放射線の性質と利用にも触れること」、同解説理科編には、「真空放電と関連させてX線にも触れるとともに、･･･」と、2 年生でクルックス管からの放射線の発見の歴史や性質と利用を学び、3 年生ではエネルギー資源としての「原子力・放射線」を学ぶ構成になった。ところでこれまであまり気にかけることなく使ってきたクルックス管について、X線の発見の歴史から、クルックス管を使う危険性がクローズアップされるのではと考えた。

２．クルックス管を使った授業実践概要

従来の中学校でのクルックス管を使った実験は、電流の正体としての電子の流れの発見につながる重要な実験である。また、雷などの放電現象という自然現象を理解するのにも大切で、生徒が感動を持って学ぶことができる重要な実験・観察である。是非、実際に体験させたいものである。しかし、X線の発生が絡んでくると、放射線の危険性を心配する周りの声から、実験・観察を躊躇する教員も出てくる可能性がある。そこで、自らも測定を行って見たが、中学校にあるような簡易放射線測定器では、本来の用途が違い正確に測定できないことが分かった。そこで、是非、専門家の先生方に実際の測定データや安全性について調べていただき、広く学校の教員に情報を提供していただく意義は大きいと考える。

３．その他の放射線学習の教材開発

これまで原子力発電に伴う放射線や放射性物質の学習では、放射線・放射性物質を原子力利用の負の面として捉え、厄介ものという扱いであった。そして、原子力発電の長所よりも短所が強調された。しかし、3.11 の福島原子力発電所の事故を経て、放射線そのものに対する学習の意味合いは変わった。放射線そのものの正しい理解や科学的な判断が出来る学習の重要性が増した。そのためには、危険性を踏まえた上で、話だけで終わる学習ではなく、実験・観察も取り入れた放射線学習が必要である。それで、これまで様々な放射線学習に関する取り組みを行ってきた。例えば、大学連携でSPP（サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト）を行い放射線について総合的に学んだり、放射線観察の方法（測定器利用、ペルチェ霧箱づくり）、放射線の代替としての紫外線や赤外線を使った放射線理解実験（生物影響に関連する実験を含む）、原子の構造を理解するための原子モデルづくり、企業と連携した放射線利用教材発掘などである。これらについても紹介する予定である。

４．まとめ

今回のパネル討論会は、「放射線防護の視点から、クルックス管の取り扱いのガイドラインについて、･･･魅力ある放射線授業の普及拡大を図ること」を目的としている。先にも書いたが、学校は低エネルギー放射線を測定する機器を持ち合わせていないし、放射線の人体影響に関する情報についても、100mSv 以下の確率的影響については、未だに専門家の間でさえ決着がついていないような段階（？）で現場の教員にできることは少ない。可能であれば専門家から、クルックス管について、簡易的にでも放射線量を確認する方法や、安全な取扱のガイドライン、あるいは同等の効果が得られる代替装置・実験を提案していただくのが願いである。

[*1] Eiheiji-chou Shihikita Elementary school

パネル討論 2(3)

箔検電器によるクルックス管からのX線の測定

Measurement of X-rays from Crookes tube with leaf electroscope

名古屋大学[*1]　　○森　千鶴夫[*1]

(MORI, Chizuo[*1])

1. はじめに

先ず、クルックス管からのX線を学校の先生方ご自身で測定することが望ましいことについて述べる。最近、低電圧で作動するクルックス管が発売されていて、X線はガラス管の外には出ない。しかし、このようなクルックス管への買い替えがすべての学校ですぐに進むことは期待できない。従来のクルックス管でも、当パネル討論の最初の報告に述べられている「暫定ガイドライン」を守る限りX線はほとんど外部に出ないと思われる。このような状況ではあるが、ガス入り放電管はガスの分解やガラス管壁への付着などの影響で、経年変化があり、かつその日の温度などの状況によって動作が変化し、X線の発生を伴う場合がある。このような場合にはX線の線量率の測定やX線の遮蔽の効果の実験をすることが安全管理上望まれる。また、クルックス管の電圧を上げ、意識的にX線を発生させて、X線の吸収実験や、X線が空気を電離する現象を理解するための実験などを教材とする場合も考えられる。これらの場合においても先生方自身によるX線の測定が望まれる。

図１　実験装置の配置

ところが一般的に学校には高価な放射線測定器を保有していない。しかし、箔検電器はほとんどの学校が保有している。従って、クルックス管からの漏洩 X 線の線量率を、市販の箔検電器を用いて学校の先生方自身で測定することができる。箔検電器の箔の開き角が X 線照射によって半分に減少する時間すなわち後述する半減時間を測定する。その半減時間を、筆者らが提供している検量線に当てはめるだけで X 線の線量率が分かる。この方法は、当パネル討論の最初の報告「クルックス管プロジェクト」の活動を補完するもので、やや誤差は大きいが全国のどの学校においても、先生方自身で容易に実施できる。ここでは、あまり詳細な議論は避け、この方法の妥当性を簡単に述べた上で、先生方に実際に行なって頂く手順などを少し詳しく述べる。

2．検量線作成の概略と評価

検量線を作成[1)]するための実験装置を図1に示す。先生方が実際に箔検電器でX線の線量率を測定する場合には電離箱は必要ない。またAMラジオは誘導コイルから電波が発生していることを知るために置いているので無くても良い。

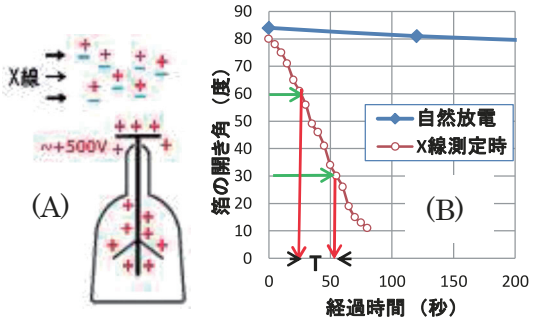


図２　(A)箔検電器による X 線測定の原理、(B)箔の開き角が減少する時間（半減時間 T）の測定。

箔検電器による X 線測定の原理を図2の(A)に示す。箔検電器に例えば正の電荷を荷電して箔を開かせれば、箔や電極は正の数百 V になっている。従って、X 線によって空気中に作られた正負のイオンのうち、負のイオンは電極に引き寄せられ、正の電荷を中和して箔が閉じる。図2の(B)に示すように、箔の開き角が 60 度から 30 度になるまでの時間

---

*1 Nagoya University

(ここでは半減時間 T と呼ぶ)を測定する。半減時間は箔に正の電荷を荷電した場合(T_+)と負の電荷を荷電した場合(T_-)とでは、一般にかなり異なる。しかし、両者の幾何平均値 T {=($T_+ \times T_-$)の平方根}をとれば、Tと電離箱で測定したX線の線量率の間には図3に示すように、半減時間 T(秒)と 線量率 S(μSv/h)の関係が得られる。この関係を検量線、($S=5.47\times10^4\ T^{-1.45}$)と呼ぶ。この検量線の誤差は約±30%である。半減時間 T は X 線の線量率が等しい場合には、市販のどの箔検電器においてもほぼ同じであることを確認した。即ち、図3の検量線は市販のほぼ同型の箔検電器に対してそのまま使用できる。

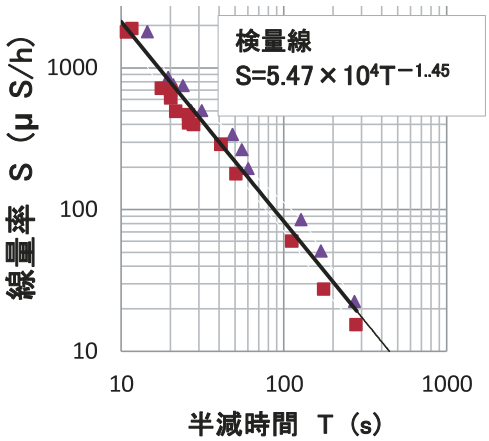


図３　箔検電器で測った半減時間 T と X 線の線量率 S の関係を示す検量線

3. 市販の箔検電器による線量率測定の具体的手順

①最初に箔検電器への正負の荷電の仕方を少し詳しく述べる。塩化ビニールのパイプをホームセンターや通販で購入(約200 円/m)し、パイプ1m を普通のノコギリで 3 個に切断する(1 個あればよい)。布で塩ビパイプを摩擦するとパイプは負に帯電する。箔検電器に正の電荷を荷電するには、図4の(A)のように負に帯電したパイプを上部の電極に近付ける。箔が開くが、手を電極に触れると箔は閉じる。手を電極から離し、次いで塩ビパイプを遠去けると箔が開く。箔の開き角度が 60 度以下であれば上記の操作を繰り返す。負の電荷を荷電するには、塩ビパイプを布で摩擦し、図4の(B)のように電極に直接触れ、電極をやや摩擦してパイプ表面の電子を電極に移すようにすると箔が開く。ゆっくりと塩ビパイプを斜め上方に離すと箔は少し閉じる。この操作を数回繰り返す。荷電後にパイプや布を箔検電器の傍には置かない。なお箔検電器には図5のように角度を示す目盛り紙を貼ると良い。

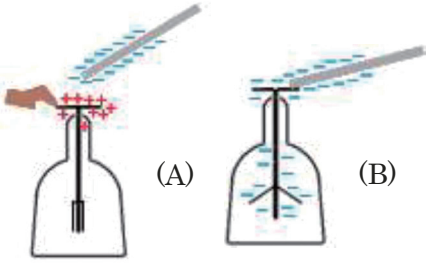


図４　(A)箔検電器に正の電荷を荷電、(B)負の電荷を荷電

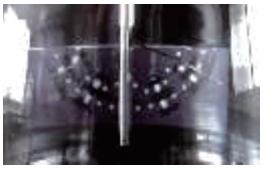


図５　箔検電器のガラスに貼った目盛り紙

以下が半減時間の測定と線量率を求める具体的な手順である。

②箔検電器を、クルックス管の周囲で X 線が出ているかもしれない位置に置く。

③塩ビのパイプを布で摩擦して箔検電器に正の電荷を荷電し、箔を 60 度以上に開かせる。誘導コイルのスイッチを入れて、クルックス管に高電圧を印加する。箔が閉じて行くならば 60 度から 30 度までの時間(秒)を測る。10 分以上経過してもほとんど閉じなければ、X 線はほとんど出ていない。半減時間 T_+が 10 分以下であれば、箔検電器に負の電荷を荷電して半減時間 T_-を測る。両者に 5 倍程度以上の差があれば、誘導コイルとクルックス管をつなぐ 2 本の導線を図 1 のようにほぼ並行になるようにして、再度 T_+と T_-を測る。T_+と T_-の幾何平均値即ち半減時間 T を $T=(T_+\times T_-)^{0.5}$ で計算する。誘導コイルのスイッチは、測定時以外は OFF にする。箔の動きは直接目で観察しても良いが、デジカメのビデオモードで撮り後で読み取ってもよい。

④図3から T に対する線量率 S(μSv/h)を求める。10(μSv/h)以下であれば実質的にはあまり問題ない。

4．まとめ

手持ちの箔検電器によってクルックス管からの漏洩 X 線を先生方自身で測定することができる。箔検電器はこのほかにもいろんな実験に使用できる魅力的な実験器具であり[1)]、クルックス管と 1 対をなす誘導コイルもいろんな実験に使用できる。臨機応変に活用したいものである。

１）　森 千鶴夫、箔検電器による放射線の測定および他の理科実験、放射線教育、**22**, No.1, 3-12 (2018)

パネル討論 2(4)

理科実験向け冷陰極式クルックス管のX線発生に関する安全の取り組み
Safety efforts taken on X-ray emission of cold cathode Crookes tube used in Science experiments

ケニス株式会社[*1]　　○若松　巧倫[*1]
(WAKAMATSU, Yoshinori[*1])

１．はじめに

ケニス株式会社は、小・中・高等学校の理科実験器具を製造販売しているメーカーである。冷陰極式クルックス管（以下、クルックス管）は、創業（昭和 22 年）間もなくして取り扱いをはじめ、70 年近く経った現在においても、その基本構造は変わりなく、生徒に電子の存在を確認させ、電子の流れが電流に関係していることを理解させるための教材として使用されている。クルックス管は使用する際に、X 線が発生することは周知の通りであるが､理科実験における安全に対する意識が高まったこともあり、弊社では 10 年ほど前から自社の安全基準を定め、本製品の取扱説明書等での注意喚起を行ってきた。

２．現行のクルックス管に関する注意喚起

平成 23 年には理科教材メーカー各社が所属する（公社）日本理科教育振興協会から各理科教材メーカーに対し、クルックス管の安全に取り扱うための注意内容が通達されている。それ以来、理科教材メーカー各社から販売されているクルックス管には、下記のような推奨する使用方法が取扱説明書に記載されている。

＜現行のクルックス管の安全に関する取り扱いについて＞
①誘導コイルの電極を 4cm 以下にしての実験を推奨すること
②放電現象の観察は、クルックス管から１m以上離れて見ることを推奨すること
③放電現象をさせる時間は 10 秒以下の短時間を推奨すること

３．低電圧タイプのクルックス管の販売

理論的にクルックス管は、掛ける電圧が低ければ、発生した X 線がクルックス管自体のガラスで遮蔽される。そのため、昨年から低電圧タイプのクルックス管の開発を大阪府立大学 研究推進機構 放射線研究センター 秋吉優史先生と進めている。また、低電圧タイプのクルックス管を使用するためには、従来の誘導コイルでは 10kV 以下の電圧を出力することが難しいため、専用の高電圧電源装置の販売に向けて準備を進めている。

低電圧型クルックス管

高圧電源装置

[*1] KENIS LIMITED

3a-Ⅰ-01

箔検電器によるクルックス管からのX線の測定（Ⅱ）

Measurement of X-rays emitted from Crookes tube with leaf electroscope（Ⅱ）

[1]名古屋大学、[2]大阪府立大学、[3]愛工大名電高等学校、[4]愛知県立名古屋南高等学校、[5]名古屋市立山田東中学校、[6]中部原子力懇談会、[7]放射線教育フォーラム、[8]日本科学技術振興財団、[9]札幌市立白石中学校

○森千鶴夫[1]、緒方良至[1]、秋吉優史[2]、臼井俊哉[3]、村上浩介[4]、羽澄大介[5]、中村嘉行[1]、渡邊賢一[1]、瓜谷 章[1]、神谷 均[6]、佐合 穣[6]、宮川俊晴[7]、田中隆一[7]、掛布智久[8]、森山正樹[9]

(MORI, Chizuo[1†], OGATA, Yoshimune[1], AKIYOSHI, Masafumi[2], USUI, Toshiya[3], MURAKAMI, Kohsuke[4], HAZUMI, Daisuke[5], NAKAMURA, Yoshiyuki[1], WATANABE, Kenichi[1], URITANI, Akira[1], KAMIYA, Hitoshi[6], SAGOU, Yutaka[6], MIYAKAWA, Toshiharu[7], TANAKA, Ryuichi[7], KAKEFU, Tomohisa[8], MORIYAMA, Masaki[9])

1. はじめに:　クルックス管からの漏洩X線の線量率を、市販の箔検電器を用いて測定する方法について昨年の当研究発表会で報告[1)]した。この方法は、あらかじめ筆者らが箔検電器の箔の開き角がX線照射によって半分に減少する時間すなわち半減時間を電離箱で校正して検量線を求め、この検量線を学校の先生方に使って頂く方法である。

今回は、より信頼性のある検量線の作成、検量線に及ぼす周辺の電界や風などの影響、多種の箔検電器への検量線の適用性、電離箱との相違などについて報告する。

実験装置を図1に示す。

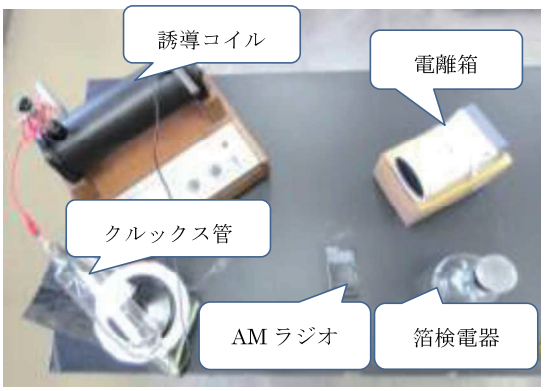


図１　実験装置の配置

2. 改良と検討:　以下に箇条書きで記す。

① 誘導コイルからクルックス管への2本の導線の配置（並行か陰極導線が机上か）によって半減時間が大きく異なるが、箔検電器に正の電荷を荷電した場合の半減時間と負に電荷を荷電した場合の半減時間の幾何平均値は導線の配置にほとんど影響を受けないことを見出した。この幾何平均値と電離箱で測定した線量率の関係（検量線）を図2に示す。

② 微風でも箔検電器へのイオンの収集に大きな影響を及ぼす。窓を閉める等の措置により風の影響を極力少なくした。

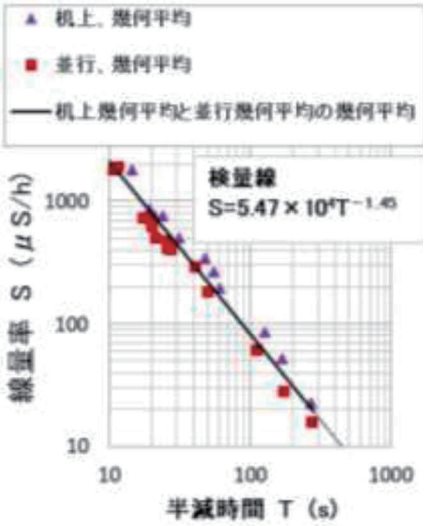
③ 中学校や高等学校が保有している通常の市販の種々の箔検電器に、対して、図2の検量線はそのまま適用できる、図3参照。

④ 箔検電器の電極などから放出される電子の影響は約2%で小さい。

⑤ 図2の検量線の勾配から、X線によって発生した空気中のイオンの再結合が起きていることが分かった。即ち電離箱を開放型にして再結合領域で動作させ、しかも印加電圧を徐々に下げて行く状態に近い。

⑥ 箔検電器を使って、X線の吸収実験などの応用測定が可能である。

⑦ 箔検電器によるX線の線量率測定のマニュアル作成が必要である。



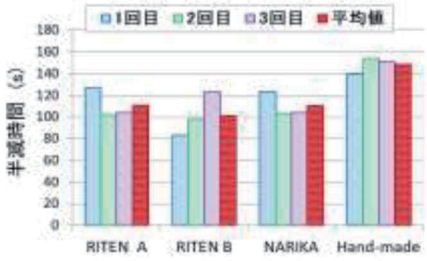


図３　異なる箔検電器の半減時間

3. まとめ:　中学校や高等学校でのクルックス管を用いた電子線の実験において、X線が放出されているかどうか、どの程度の線量率であるかを、手持ちの市販の箔検電器と今回提供した検量線を使って測定することができる。理科の新学習指導要領に沿って、この方法が活用されることを願っている。

1) 第55回アイソトープ・放射線研究発表会要旨集(2018)p102

*[1]Nagoya University

3a-Ⅰ-02

クルックス管誘導コイルのパルス電界による炎や箔の振動

Vibration of frame and leaves by electric field of Crookes tube induction coil

[1]名古屋大学、[2]大阪府立大学、[3]愛工大名電高等学校、[4]愛知県立名古屋南高等学校、[5]名古屋市立山田東中学校、[6]中部原子力懇談会、[7]放射線教育フォーラム、[8]日本科学技術振興財団、[9]札幌市立白石中学校

○森千鶴夫[1]、緒方良至[1]、秋吉優史[2]、臼井俊哉[3]、村上浩介[4]、羽澄大介[5]、中村嘉行[1]、渡邊賢一[1]、

瓜谷 章[1]、神谷 均[6]、佐合 穣[6]、宮川俊晴[7]、田中隆一[7]、掛布智久[8]、森山正樹[9]

(MORI, Chizuo[1†], OGATA, Yoshimune[1], AKIYOSHI, Masafumi[2], USUI, Toshiya[3], MURAKAMI, Kohsuke[4], HAZUMI, Daisuke[5], NAKAMURA, Yoshiyuki[1], WATANABE, Kenichi[1], URITANI, Akira[1], KAMIYA, Hitoshi[6], SAGOU, Yutaka[6], MIYAKAWA, Toshiharu[7], TANAKA, Ryuichi[7], KAKEFU, Tomohisa[8], MORIYAMA, Masaki[9])

1. はじめに: クルックス管の実験に用いられる誘導コイルからは数十kVのパルス状の高電圧が発生している。これに伴い周囲に強い電磁界が出ていることがAMラジオで確認できる。また電界によって炎や紙片、箔などが振動することが観測できる。クルックス管の実験の際にこのようなデモ実験を行なえば電磁界の理解に役立つと思われる。以下の実験を発表当日に主にビデオモードで報告する。

2. パルス電界の箔や炎に及ぼす影響:

2.1 誘導コイルからの電波をAMラジオで聞くことができる(図1)。

2.2 箔検電器の箔の揺らぎ: 誘導コイルの正電極の傍に箔検電器を置くと、箔検電器の電極に荷電しなくても箔が開き振動する。図1はティッシュペーパーを箔とした手作りの箔検電器であるが、市販の錫箔の通常の箔検電器でも同じである。

図１ 正電圧の電極の傍に置いた箔検電器の箔の振動

2.3 導電性の紙を幅2mmで異なる長さに切り、すだれ状の試料を作り陽極に付けたアルミ板の傍に置いた。誘導コイルのパルス周波数を大きくして行くと、すだれの振動する位置が図2の長い紙(左側)から短い紙(右側)へと移動する。共振周波数の概念が目視的に分る。この共振周波数は機械工学の片持ち梁の共振周波数の理論値とほぼ一致する。

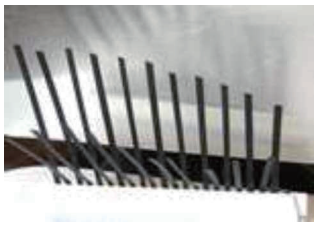


図２ 長さの異なるすだれ状の導電性の細長い紙の振動

2.4 図3は、2枚の金網の電極の間にローソクの炎を置いている。Aは右の電極に正の高電圧を印加した場合で炎は左に傾く。炎の光る部分は主に正のイオンや正電荷のススである。この現象はインターネットなどにも報告されているが本実験の場合にはパルス高電圧であるために、パルスに応じて炎の先端が激しく振動する様子が観察される。Bは下の電極に正の電圧を印加した場合で、炎が上方に伸びている。放電も起きるため雷光の理解にも役立つ。

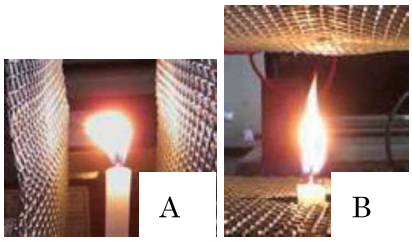


図３ ローソクの炎を２枚の金網の電極の間において、A：右の電極に正のパルス高電圧を印加した場合、B：下の電極に正のパルス高電圧を印加した場合で、A,B ともに炎は振動する。

3. まとめ: 電子線の実験器具であるクルックス管と対をなしている誘導コイルによる上述の実験は、「放射線」に直接的な関係はないが、中学校や高等学校においてはこのコイルは貴重な高電圧電源であり、いろいろなデモ実験ができると思われる。敢えて放射線との関連を言えば、電波と電磁波放射線との関連や、炎のイオン化と放射線のイオン化との関連などが挙げられる。

*[1]Nagoya University

3a-Ⅰ-03

電子線に着目したクルックス管観察の学習展開を考える
Consideration of Learning Development from Crookes Tube Observation Focusing on Electron Beam

放射線教育フォーラム*　　田中　隆一
(TANAKA Ryuichi)

1.　はじめに

中学校理科の学習指導要領改訂によって、真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れることが加わり、X線実験に始まる放射線学習が注目されている。ここでは、クルックス管による真空放電実験において観察される管内蛍光板上の筋状発光が、誘導コイル等の高電圧で加速された電子による電離作用の結果である、と気付くことによって、これまで、電流としての認識に留まっていた管内の電子線もX線と同様に放射線であることに着目し、放射線学習への展開を専門家的な視点で考察した。真空放電と関連付けながら、通り抜ける性質、及び電磁界の作用を受けるという性質に加えて、それらの性質を活かして発展してきた今世紀初頭までの放射線利用の学習展開の新しい可能性を検討した。

2.　放射線としての電子線の性質に関する考察

クルックス管内を通り抜ける電子のエネルギーは数～30 keV 程度であり、数百 keV 以上の典型的な放射線に比べれば桁違いに低いが、気体の原子・分子１個を電離するのに要する電子の平均エネルギー(＜50 eV)に比べれば十分に高いので、クルックス管内の電子線を放射線として扱うことに問題はない。

一方、十字板を内蔵し蛍光剤を管背面内側に塗布したクルックス管による実験(図１)において、管背面に十字板の投影像が観察されることから、電子が通り抜ける性質を学べる。電離作用がもたらした十字板の影は、高電圧の陽極が管の側面に設置されているにもかかわらず、加速された電子が管内の極めて希薄な気体中を十字板に向かって直進的に通り抜けることを示している。両極間の電位差は陰極近傍の狭いエリアに偏在し、かつ、管内の気体物質が極めて希薄であるので、加速された電子が気体物質（実質は原子・分子内の荷電粒子）と衝突する頻度が極めて小さく、大半の電子は偏向せずに管内をほとんど“素通り”し、管の背面まで達する。

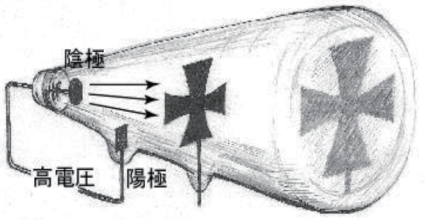


図１　十字板を内蔵するクルックス管実験（蛍光物質を塗布した管背面が発光）

3.　放射線としての電子線の利用に関する考察

クルックス管などの陰極線研究の歴史的成果としてのX線発見直後から、放射線診断をはじめとする医療への利用が瞬く間に世界中に広まり、第１回ノーベル賞授賞(1901 年)を促した。この歴史を踏まえて、放射線利用に関する学習へ導くのが放射線授業の効果的な進め方である。電子線に着目すると、クルックス管を含めた陰極線管は最初の人工放射線源として位置づけられるが、陰極で発生した電子を加速する装置であるという視点から、電子加速器の起源とみなすこともできる。加速器というと、100 万電子ボルト以上の高エネルギーの加速装置が広く知られているが、それ以下の比較的エネルギーの低い多種類の加速器も開発され、医療だけでなく、学術や産業の分野においても、放射線利用が 20 世紀を通して多様に発展した。放射線発見の当初から開発が進んだX線発生装置、オシロスコープ、ブラウン管、電子顕微鏡だけでなく、スマートフォン製造を支える電子線マスク描画装置も広義の意味では半導体加工のための電子加速器であり、放射線の発見に触発されて開花した放射線利用技術の成果として捉えることができる。

4.　まとめ

筋状及び管背面の発光原因が電子線による電離作用であることは放射線学習への展開を容易にする。一方、放射線の通り抜ける性質には、極めて希薄な気体など、クルックス管特有の物理的条件が絡むので、この性質の適切な理解へのわかりやすい工夫が課題である。放射線の発見を導いたクルックス管は最初の人工放射線源であり、加速器の原点でもある認識を踏まえて、２１世紀の生活環境を変えたスマートフォンに至る科学技術の発展を理解することが期待される。

＊Radiation Education Forum

化学の目で見た物理と放射線

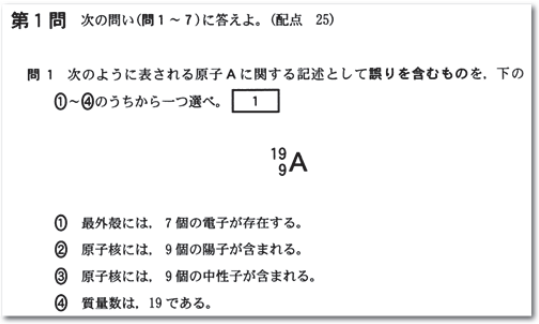
立教新座中学校・高等学校　渡部　智博

1　はじめに

ある時，同僚の物理の教師と話していて，どうしても話が噛み合わないことがあった。よくよく話してみると，物理の目で見たことと，化学の目で見たことに違いのあることに気づいた。

2　元素記号

2019 年 1 月 20 日のセンター試験の「化学基礎」で次のような問題が出題された。



第 1 問　次の問い（問 1 ～ 7）に答えよ。（配点　25）

問 1　次のように表される原子 A に関する記述として**誤りを含むもの**を，下の①～④のうちから一つ選べ。 1

$^{19}_{9}A$

① 最外殻には，7 個の電子が存在する。
② 原子核には，9 個の陽子が含まれる。
③ 原子核には，9 個の中性子が含まれる。
④ 質量数は，19 である。

解答は，言うまでもなく③であり，A はフッ素 F である。

中学 3 年生の理科，並びに高等学校の化学基礎の教科書には，図 1 が描かれている。

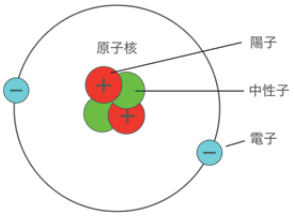


図 1　ヘリウム原子とその構成粒子

また，高等学校の化学基礎と物理には，元素記号の書き方が紹介されている（図 2）。

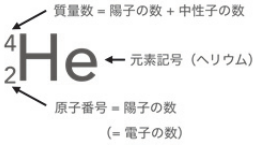


図 2　質量数・原子番号の書き方

原子の構造と元素記号との関係を理解できるようになる。

化学基礎では，中性子が化学的性質にはほとんど関係ないということから，電子配置を示す場合には中性子を除き，原子核を「n+」とし，各電子殻に電子を描く。また，元素記号を $_{2}He$ のように記す。そして，イオンの生成を学ぶ。

このようにして化学基礎を学んだ生徒は，それぞれの原子構造と元素記号とを図 3 のように対応して理解する。

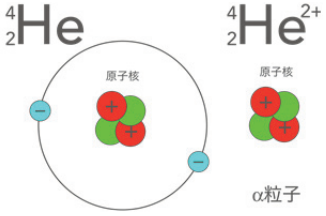


図 3　原子の構造と元素記号

化学基礎の教科書には，放射性同位体の記述がある。特に，炭素-14 の半減期が約 5730 年であり，窒素-14 に変化することが記述されている。

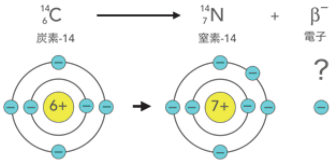


図 4　放射性壊変の様式

このとき，化学基礎を学んだ生徒は，図 4 のように捉えがちである。よく考えてみれば，図 5 のように，炭素-14 や窒素-14 が，原子核を示していることがわかる。

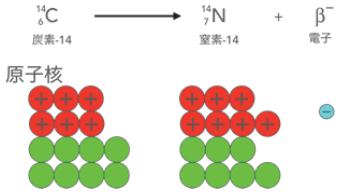


図 5　放射性壊変の様式

なぜ，このようなことが起こるのであろうか。それは，同位体に関する説明が，化学基礎と物理とで異なっていることに原因の一端があると考えられる。

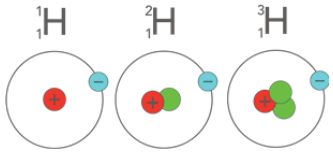


図 6　同位体（化学基礎）

化学基礎では図 6，物理では図 7 のようにして説明されている。化学基礎では電子を含めた元素記号であり，物理では，電子を除いた元素記号として理解されていることがわかった。

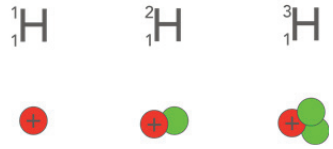


図 7　同位体（物理）

高等学校の化学基礎を学んだ生徒は図８，物理を学んだ生徒は図９のように，原子の構造と元素記号とを結びつけることになるので，教える際には注意する必要がある。

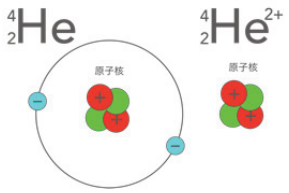


図８　元素記号（化学）

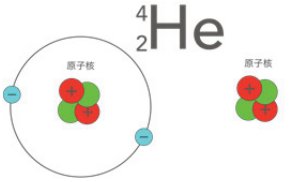


図９　元素記号（物理）

化学の目で見ると，α線の行方などに疑問を生じることがある。α線は紙一枚で止まる，β線はアルミニウムなどの薄い金属で止まる，γ線は厚い鉛板などで止まると説明されている。紙で止まった後，α線，すなわちヘリウムの原子核はいったいどうなるのか。電子を捕獲してヘリウムに変化すると言われると安心する。$He^{2+} + 2e^{-} \rightarrow He$ ということであろうか。β線，すなわち高速の電子は，金属に衝突して運動エネルギーを失い，金属の自由電子になるというところまで説明がほしい。γ線は，核外電子を励起させるなどしてエネルギーを失い，いわゆる化学式で説明することができないと言ってほしい。

化学と物理とでは，原子の捉え方が若干異なっているように思われる。化学では，原子核と核外電子の両方で原子を表し，物理では原子核のみに着目することが多いようである。

一般に，「113 番元素の合成」と言われる。理研のホームページには，「113 番元素の合成の原理は数字の上では単純です。亜鉛（Zn 原子番号 30，陽子数 30 個）の原子核とビスマス（Bi 原子番号 83，陽子数 83 個）の原子核を衝突させ，融合させれば 30 + 83 = 113 番元素が出来上がります。」とある。

化学では，元素と原子を区別して教えている。このため，113 番元素の合成という表現には違和感を感じる。元素でもなく，原子でもなく，原子核が合成されたのではないかということである。例えば，原子番号 113 の原子 Nh が合成されたと言われると，原子核中の陽子が 113 個，そして電子が 113 個と捉えてしまう。

3　定数と単位

高等学校の化学で学ぶ定数の一つに，気体定数 R がある。

$$R = \frac{pV}{nT} = \frac{1.013\times10\ \ \mathrm{Pa} \times 22.4\ \mathrm{L/mol}}{273\ \mathrm{K}}$$

$$\left.\begin{aligned} &= 8.31 \times 10^{3}\ \mathrm{Pa{\cdot}L/(K{\cdot}mol)} \\ &= 8.31\ \mathrm{Pa{\cdot}m^{3}/(K{\cdot}mol)} \end{aligned}\right] \text{化学}$$

$$= 8.31\ \mathrm{J/(K{\cdot}mol)} \qquad \text{物理}$$

化学では，「Pa・L/(K・mol)」，「Pa・m^3/(K・mol)」でとどまることが多い。一方，物理では「J/(K・mol)」としている。

遡ってみると，小学校の理科で「かさ」の概念を学んだときにリットルの単位で示し，算数でかけ算を学んだ後に立方メートルなどの単位を学ぶ。このような事情もあり，単位の換算に手間取る生徒が多い。

4　まとめ

化学と物理では，同じような用語を用いていながら異なる概念を示していることもある。このため，高等学校までの段階では，注意して授業を行う必要のあることがわかった。

5　謝辞

本報告にあたり，教育課程検討委員会の先生方にご助言，ご指導を頂きました。黒杭清治委員長，並びに大津浩一，田中隆一，広井禎，村石幸正の各委員に感謝申し上げます。また，島野誠大，林壮一の両先生らとの議論を通して，物理と化学の関係に関わる理解を深めることができました。あわせて御礼申し上げます。

小中学校の国語・社会の教科書における「放射線」の記述

福岡大学 林 壮一

よく知られているように，小学校や中学校，高等学校で使用されている教科用図書（以下、教科書）は、文部科学省（文科省）によって検定を受けたものが使用されている。本稿では、この小中学校の理科以外の教科書で、放射線や放射線に関連した記述がどのように成されているかについて調査した結果をまとめた。

まず、教科書がどのような手順で検定を受けて学校で使われているかについて、文科省の Web ページ※1を参考にしながら，現在使われている教科書が学校で使用されるまでを整理しておく。

小学校

平成 20（2008）年 3 月　学習指導要領告～
　　教科書　著作・編集作業
平成 21（2009）年　教科書検定
平成 22（2010）年　教科書見本→採択→供給
平成 23（2011）年 4 月　学習指導要領施行
　　教科書使用開始

中学校

平成 20（2008）年 3 月　学習指導要領告示～
　　教科書　著作・編集作業
平成 22（2010）年　教科書検定
平成 23（2011）年　教科書見本→採択→供給
平成 24（2012）年 4 月　学習指導要領施行
　　教科書使用開始
（数学と理科は、平成 23 年より先行実施）

次に，放射線に関連した用語として、「原子」や「放射線」という語句が学習指導要領に記載されているかを確認したところ、小学校と中学校の社会科では、現行学習指導要領にも次期学習指導要領（平成 29（2017）年告示）にも記載があった。

小学校社会科

現行・次期とも 6 学年　我が国の歴史（原子爆弾の投下）
現行　3・4 学年　身近な地域や市
（電気の供給：原子力発電）
次期　4 学年　健康や生活環境を支える事業
（電気の供給：原子力）
（東日本大震災において原子力発電所で大きな事故～）

中学校社会科

現行・次期とも
原子（原発，原子力発電所，原子力）
原子爆弾（1）　歴史的分野：広島・長崎への原子爆弾の投下

このように、現行と次期の小学校と中学校の学習指導横領では、「原子」という語句について、社会科で「原子力」という用語として扱うことになっていることを確認した。理科で「原子」という語句がでてくるのは、中学校第 1 分野なので、それ以前に「原子」は「原子力」、「原子力発電」という用語として学校で習う言葉であることを確認した。

そこで、具体的に教科書にはどのように書かれているかを、現在発行されている小学校と中学校の国語や社会科の教科書を調査することとした（この調査では、木村弘幸〔福岡大学理学部物理科学科 2019 年 3 月卒業〕が中心になった)。

上記の補足として、小学校、中学校ともに、国語の学習指導要領には「原子」、「放射線」、（原子力に関連して）「戦争」などの語句は記されていなかったことを確認しておきたい。つまり、国語の教科書がどのような題材をどのように扱うかは各出版社に任されており、国語科の教科書でも「原子」や「放射線」に関連した題材が扱われていることを確認した。

以下、具体的な記述の一部を紹介する（本

文は、現行の教科書からの抜粋引用であり、下線は筆者が付した)。

国語科

・三省堂　小 4　「いわたくんちのおばあちゃん」：世界ではじめて、人の上に原子ばくだんが投下されたのです。目がくらむような光。

・学校図書／教育出版　小 6　「川とノリオ」：八月六日　注釈：広島に原子爆弾が落とされた日。

・三省堂　小 6　「猿橋勝子」：戦争が終わってからも、多くの人々が放射能を浴びた後遺しょうで苦しんでいることを、日本中の国民が知っていた。

・光村図書　小 6　「平和のとりでを築く」：強烈な熱線と爆風が放射線とともに市街地をおそった。赤ちゃんだったころに原爆の放射線を浴びたその少女は十数年たって、突然、被爆が原因とみられる病にたおれたのだった。

・教育出版　中 3　「語り継ぐもの」：1966 年、原爆病院では被爆したかたたちが苦しみ、あの日家を失った人たちはスラム街のようなところで生活していたのである。

社会科

・日本文教　小 3・4　これからの発電　原子力発電：地しんがおきたときや事故がおこったときなどの危険性について、人々の間に不安がある。

・教育出版　小 5　わたしたちのくらしと資源・エネルギー：2011（平成 23）年に発生した東日本大震災では、原子力発電所の一つが事故を起こし、今も広い地域で人々のくらしに大きなえいきょうをおよぼしています。

・日本文教　小 6　広島と長崎への原爆投下と日本の敗戦：生き残った人でも、放射線による後遺症によって苦しみ、その後も死者は増え続けました。

・東京書籍　小 6　原子力発電所事故からの復興：大量の放射性物質がもれ出したため、政府は周辺の市町村に避難指示を出しました。何万人という人々が長期間にわたってふるさとを離れて生活しなくてはならなくなったのです。政府は放射性物質を取り除く除染作業を始めました。また、人々の健康管理や農作物の放射線検査なども行うことにしました。

・帝国書院　中歴史　ポツダム宣言と日本の敗戦：その時に生き残った人々も、放射能の後遺症などによって苦しみました。

・学び舎　中歴史　にんげんをかえせ　放射線が人びとを苦しめる：被爆した人たちを、その後も長く苦しめたのは、原爆が発した放射線による被害でした。放射線は、嘔吐、発熱、倦怠感、貧血、下痢などの症状を慢性化させました。また毛が抜け落ちたり、白血病を発症させ、肺がん、食道がん、肝臓がんなど、内臓にがんを多発させたりしました。逃げるときに放射性降下物(死の灰)をふくむ黒い雨にあいましたが、その後は元気に暮らしていました。ところが 12 歳のときに身体に異変を感じ、白血病と診断されました。

・清水書院　中地理　持続可能な未来へ：東日本大震災にともなう福島第一原子力発電所の事故では、大量の放射性物質が放出された。拡散した放射性物質は、東日本を中心に日本全国におよんだだけでなく、(以下略)

以上のように、社会問題を扱うことや人々の痛みや苦しみを伝えることなどは、生徒達の学びにとって必要な題材であり、教材でもある。しかし、そのためには、学習を進める教員が原子や放射線についての正しい知識を身につけている必要がある。多くの教員の目に触れるように、教員研修や教員免許更新講習、教科書の指導書などにもわかりやすい補足説明をするなどの工夫も必要であろう。また、次期学習指導要領下の教科書についても継続的に調べる必要がある。

※1：http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/kyoukasho/gaiyou/04060901/1235087.htm

放射線教育ニュースレターNo.75から転載

福島の過去に学び、現実を見つめ、未来を切り拓くコミュタン福島の放射線教育

福島県環境創造センター交流棟　教育ディレクター　佐々木 清

1. はじめに

福島県環境創造センター交流棟「コミュタン福島」は、開館して４年目を迎えた。これまで、放射線に関する正確な理解を促進し、福島県の現状を伝えることを目的とした展示室とともに、探究的な体験研修を備えた施設として、多くの学校団体等の見学・視察を受け入れてきた。また、イベント等を開催するとともに、アウトリーチ活動等により福島県内外でＰＲ活動を重ねてきた結果、今年９月22 日までに 30 万人もの来館者を迎えることができた。

２．５＋１の展示室ゾーン

コミュタン福島の展示室は、以下の５つのゾーンが設けられおり、今年になって「触れる地球」のゾーンが増えた。

(1) ふくしまの 3.11 から：福島第一原子力発電所事故からの福島の歩みを伝えるエリア

(2) ふくしまの環境のいま：復旧・復興してきた福島の今を知ってもらうエリア

(3) 放射線ラボ：知る・測る・ケア・除染・探る５つのラボで、放射線を学ぶエリア

(4) 環境創造ラボ：原子力災害から復旧・復興している福島の今を知ってもらうエリア

(5) 環境創造シアター：全球型映像で福島の環境の未来を考え創るきっかけとするエリア

(6) 触れる地球：地球環境の様々なことをデジタル地球儀に触れながら学ぶエリア

３．探究的に学ぶ体験研修

現在放射線領域の体験研修は以下の３つを提供している。今年はこれに４つ目を加えた。

(1) 身の回りの物の放射線を**測定**してみよう。

(2) **霧箱**で放射線の飛跡を観察しよう。

(3) α線・β線・γ線を**遮へい**する物を探ろう。

(4) 放射線（γ線）から**身を守る**方法を実験で確かめよう。

開館当初から指導者による一方的な説明による実験は避け、あくまでも児童生徒による探究的な体験研修を行ってきた。まず、予想を立て、その理由を考えてから実験や測定を行ってきた。次に、データを比較し、なぜそのような結果になったか、児童生徒間で対話させながらできるだけ自ら課題解決を図れるように支援するなど、児童生徒を主体に探究の過程を大切にしてきた。これにより、児童生徒は、放射線に興味・関心を抱き、探究意欲を高めながら、真剣に放射線について学んできた。

ここで、中学校「放射線測定」の実際を以下の**図１**で紹介する。

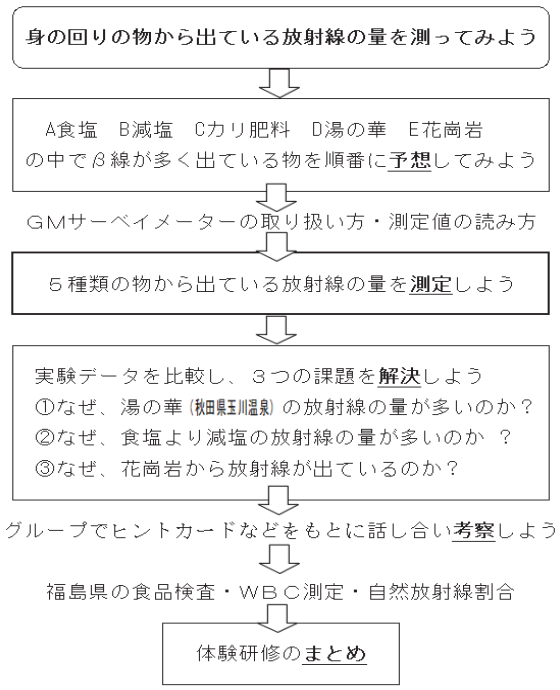


図１　中学校体験研修「放射線測定」の実際

４．面白い Science Table, Craft, Show

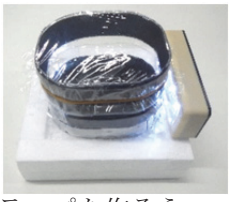
来館者に放射線を気兼ねなく学んでもらおうと、

以下の教材を開発してきた。

(1)Science Table：

①ペットボトル霧箱

②放射線探索ゲーム



(2)Commutan Craft ：

①放射線モデルストラップを作ろう。

②X線装置でレントゲン写真を撮ろう。

(3)Science Show：放射線ってなあに？Part1

５．未来を切り拓くための深い放射線の学び

(1)福島県環境創造センター3機関合同放射線出前授業の実施

福島県環境創造センターには、コミュタン福島（交流棟）に本館と研究棟が併設されている。そこで、日本原子力研究開発機構（JAEA）と国立環境研究所（NIES）とコミュタン福島の3機関が合同で、郡山市立郡山第六中学校へ出向き、放射線出前授業を実施している。昨年度1年生は、学級ごとに本館とコミュタン福島スタッフによる放射線測定の実験を行った。2年生は、学年全体でJAEA所員による放射線の基礎の講話を聞いた。3年生は、学年全体でNIES所員による放射線動態の講話を聞いた。それぞれ福島県の放射線に関する課題を取り上げ、未来に向け放射線の課題の解決に向けた情報を専門から直接学ぶ機会を与えることができた。

(2)コミュタン福島を活用した放射線学習の支援

コミュタン福島の近くに、富岡町から避難してきた児童生徒が在籍する小・中学校三春校がある。生徒一人一人が抱いている放射線の不安や悩み等を解決するため、コミュタン福島の施設を活用した個別課題研究を進めている。来館する前に「学びのマップ」を基に、課題解決に向けての情報源の位置を確かめ、効率的な動線を話し合いながら個人毎指導した。来館後生徒たちは、収集した情報を整理し、とても分かりやすい個人レポートをまとめ発表し、情報を共有した。

６．未来を切り拓く人材の育成をめざして

(1)小学校理科自由研究ポスターセッション実施

夏休みを中心に理科自由研究を行う小学生が多い。そこで、**理科自由研究相談会**を開催して研究テーマの作成や観察実験方法など応じている。また、観察記録や実験データのまとめ方や考察の仕方を助言している。さらに、完成した理科研究作品をB1版方眼紙にまとめ、口頭発表を含めた**ポスターセッション**を実施するなど、児童の科学的な表現力を向上させ、発表させている。

(2)小中高「放射線の学び」の連続性をめざして

中学生になると、放課後部活動等で時間が費やされ、小学校の理科自由研究で培った「科学の芽」が残念ながら途絶えてしまう場合が多い。そこで、今年から部活動は、土曜か日曜日のいずれか休部となるので、コミュタン福島では、この時間を活用して下記の**図２**のような小・中・高校を連続的に結びつける「**放射線の学び**」を構想し、「**サイエンスアカデミア**」や「**サイエンスコミュニケーター育成講座**」を開設して実践している。

図２　小中高「放射線の学び」の連続性

７．おわりに

甚大な被害を与えた福島第一原子力発電所事故から早8年。空間線量率は、除染と放射線の減衰によって減少するとともに、苦難を乗り越え復興に向けた取り組みが具現化している。

コミュタン福島では、「**対話**」と「**共創**」を基本に据え、正しく放射線を理解させ、福島の環境を知り、創り、発信する使命がある。皆さまのご来館を心よりお待ち申し上げたい。詳細については、右のQRコードの中の情報を閲覧してほしい。

放射線教育フォーラムニュースレターNo.76 から転載

X 線発見から原子構造の解明へ
ークルックス管による放電現象の研究ー

放射線教育フォーラム　　柴田誠一

1．はじめに

19 世紀の物理学者は、真空技術の進歩に伴い「真空」の管の中の放電現象について研究してきた。当時の真空度は現在と比べるとはるかに低いものであったが、現在、我々が当然のこととして享受している科学的基礎の多くがこれらの研究を通して明らかにされてきた。そしてこれらの研究にはクルックス管が用いられた。

ここでは、クルックス管による放電現象の観察から導かれた X 線の発見、そしてそれを端緒として展開された研究から原子構造の解明に至る現代科学の基本的概念が如何にして明らかにされたかについて簡単に紹介する。詳しい解説は、当フォーラムの「放射線教育」誌（Vol. 23 (2019)）の拙稿を参照していただきたい。

2．X 線の発見以前

気体放電の研究の初期、ファラデー（M. Faraday）は空気を薄くしていくと発光現象はきわめて起こりやすくなることを見出した（1833 年）。この放電現象の研究には、より良い真空を得ることが必要であったが、1855 年にガイスラー（H. Geissler）により性能の良い水銀ポンプが発明され、その後の研究の進展に貢献した。真空度とともに放電現象がどのように変化するかを図 1[1)]に示す。1876 年にゴルトシュタイン（E. Goldstein）がこの現象を、放電が陰極から生じていることから、「陰極線」と命名した。同じ頃、クルックス（W. Crookes）が陰極線についての系統的研究を行っている。

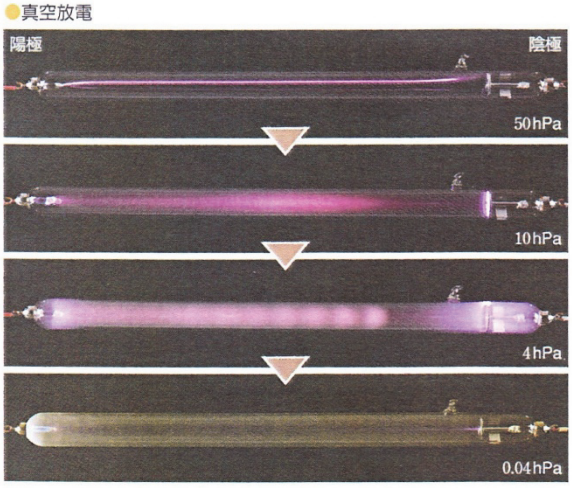


図 1. 真空放電　両端に高電圧を加えたガラス管の内部の気体の圧力を、徐々に下げていったときの様子。

3．X 線の発見

1895 年 11 月、レントゲン（W. C. Röntgen）は部屋を完全に暗くして放電現象の観察実験を行っていた。そして、放電管から少し離れたところに置かれていた蛍光物質を塗った紙から蛍光が放出されているのを見た。管とスクリーンの間に手を置くとスクリーンにその骨が見えた。レントゲンはこの「新種の放射線」を、その本性についてはまだ明らかにできなかったことから、未知のものという意味を込めて、「X 線」と名付けた。

4．特性 X 線の発見

X 線発見の後、X 線に関して行われた研究の中で重要なものとして、バークラ（C. G. Barkla）による特性 X 線の発見があげられる。X 線が物質にあたると、二次的に X 線が発生する。バークラは 1906 年以降、この二次 X 線の性質を系統的に研究し、二次放射の X 線に 2 種類あることを発見した。一つはターゲット金属の表面で一次 X 線が単に散乱されたもので、これは入射（一次）X 線と透過力などの一般的な性質において変わりはなかった。もう一つのタイプの X 線は、均一なエネルギーをもつ放射線で、一次 X 線の性質とは関係なく、ターゲットの金属の種類によってのみ決まる特性的なものであった。バークラはこれを特性 X 線と名付けた。

この研究に続いて、ラウエ（M. Laue）が結晶による X 線の回折を発見した。ラウエは 1912 年発表の論文の中で X 線の回折像の写真（ラウエの斑点と呼ばれる）を示している。この干渉現象の発見は X 線が波動としての性質をもつことと同時に結晶格子の実在を実証したことに意義がある。ラウエの写真は連続エネルギースペクトルをもつ X 線を用いて撮影されたが、ブラッグ父子（W. L. Bragg, W. H. Bragg）は単色エネルギーX 線（特性 X 線）が結晶構造解析に有利であることを指摘し、さらに自らが導いたブラッグ条件を利用して X 線の波長を決める試みをした。これらの研究は今日の X 線結晶学の端緒を開いた。

５．モーズレー（H. G. J. Moseley）の研究

バークラの特性 X 線の発見とブラッグ父子により開発された X 線の波長測定の方法に基づいて、モーズレーの特性 X 線スペクトルに関する研究が行われ、原子番号が決定された。

1913 年から 1914 年にかけて、モーズレーは元素の周期表に含まれる全元素について、その特性 X 線を系統的に調べた。バークラによって明らかにされた特性 X 線に関する事実とブラッグ父子によって開発された X 線の波長測定の方法を基盤として、研究は進められた。この研究の最も大きな成果は、原子番号が実験的に決定されうることを示し、それを原子核の正電荷数であると同定し、この電荷が元素の性質を決めることを明らかにしたことにある。

６．気体放電の研究と原子構造の解明

X 線発見に先立つ 10 年ほど前、バルマー（J. J. Balmer）は水素ガスを低圧で管中に封入して放電を起こさせ、可視光の領域に後に彼の名前をとってバルマー系列と呼ばれる水素の輝線スペクトルを発見した（図２[2)]）。

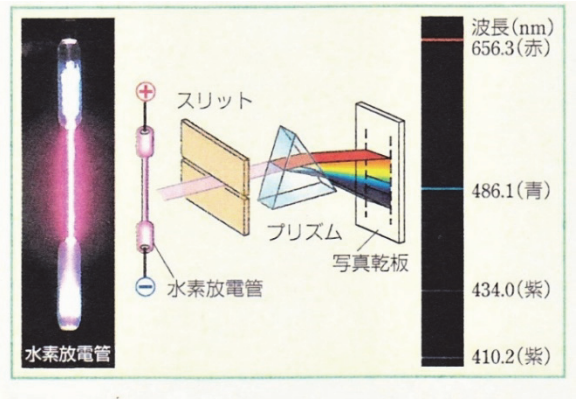


図 2. 水素原子の輝線スペクトル
（バルマー系列）

ボーア（N. Bohr）は、ラザフォード（E. Rutherford）が 1911 年に原子核を発見し、提案した原子モデル（原子の中心には正の電荷を有するごく小さな核があり、電子はずっと離れたところを運動している）と、プランク（M. Planck）が 1900 年に導入したエネルギー量子の考えを用いて、このバルマー系列の輝線の発生機構を水素原子の構造と結びつけて解明した（1913 年）。ボーアは、水素原子にはいくつかの特定のエネルギー状態があり、電子が種々の半径をもった軌道を運動していることに対応しており、一つの軌道（エネルギー準位）から他の軌道に電子が移るときにエネルギーを電磁波（光）として放出または吸収すると考えた。図３[2)]に、水素原子の光の吸収・放出機構を示す。

その後ゾンマーフェルト（A. J. Sommerfeld）らにより一般の原子の構造が明らかにされ、元素の周期表で、原子番号とともに元素の性質が変わり、類似した性質の元素が周期的に現れるという元素の周期律に理論的根拠が与えられた。

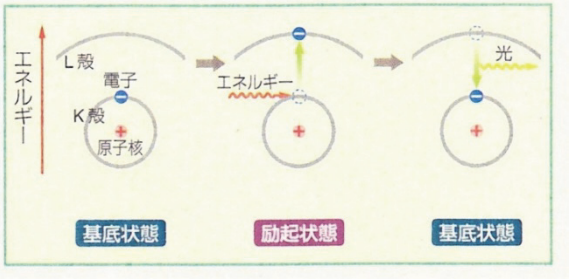


図 3. 水素原子のエネルギー吸収・放出機構

７．おわりに

2021 年度から実施される新学習指導要領では、中学理科 2 年次の「電流とその利用」の単元で真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れることとされている。しかし、その教材としてのクルックス管からは放電現象の観察に際し X 線の放出が無視できない場合がある。ここで、X 線の放出があまり強調されすぎると、教育現場における放電実験に関する学習意欲の委縮が危惧される。

自然を理解する最初のステップは目の前で起こっている現象の観察からではないだろうか。何が起こっているのか、それはどうして起こっているのか、などの疑問をもち、それを理解しようと試みる。そこから我々が現在当然のこととして受け入れている現代科学の基礎が明らかにされてきた。このことを、この放電現象を観察することにより、生徒のみなさんに是非学んでほしいと切望する。

参考文献

1) フォトサイエンス　物理図録(改訂版) 数研出版 (2019)
2) フォトサイエンス　化学図録(改訂版) 数研出版 (2012)

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 （https://www.fepc.or.jp）

電気事業連合会

TECHNOL

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

たえまない変革を続け、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。

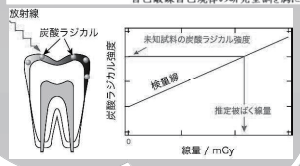
三菱重工業株式会社　パワードメイン　原子力事業部
〒100-8332　東京都千代田区丸の内 3-2-3　TEL. 03-6275-6200　www.mhi.com/jp

三菱重工

最前線のアイソトープ・放射線研究紹介
－私が研究者になるまで－

これから進学先や専門分野を選ぶ高校生や大学生に向けて、放射線や放射性同位体（RI）を利用している研究者を当協会ホームページにて紹介しています。

研究の面白さやどのような紆余曲折を経て研究者になったのかなどのメッセージもぜひご覧ください。



詳細はこちら：
https://www.jrias.or.jp/report/cat1/219.html

公益社団法人
日本アイソトープ協会
Japan Radioisotope Association