

論文

X線管の技術水準を上げたGE研究所のCoolidgeとLangmuirによる研究・開発に関する考察

兵藤友博*

要旨

1923年、X線の粒子性としての「コンプトン効果の発見」と称する、量子力学形成において一つの画期をなす実験的成果がもたらされた。その際に使用されてX線管は直接的には発見者A.H. Comptonの科学の側からの要請があってGE社で開発された、物理学者W.D. CoolidgeのX線管の技術を供したものである。しかしながら、そのX線管をGE社が供与しうるまでには、GE社における白熱電球、つづくX線管の開発が推し進められることなしにありえなかった。このX線管はもちろん従来型のX線管の延長線上にあるとはいえ、今日につながるX線管技術を達成している点で特筆すべきものである。そして、この開発に重要な役割を担ったのが、白熱電球を対象とした基礎的な科学研究（表面化学）を基礎に行った化学者・物理学者I. Langmuirである。

いうならば、産業技術を基礎にした技術開発の成果が科学研究に大きな進歩をもたらした歴史プロセス、すなわち研究・開発の一連の過程において研究成果が相互に関連しあいながら、企業内研究所の組織的研究が科学的考察を基礎に技術的成果をより効果的に上げていく過程が垣間見られる。そしてまた、この過程には、対象とする装置（電球、X線管）は、それぞれ同一型、類似型、発展型のものであったりするが、これら装置を対象とする研究者の認識の意味づけは互いに異なるものの多角的に装置を媒介に関連し合っていることである。

この小論は、20世紀初期のGE研究所において見られたリニアモデル的ともいえる、このような研究・開発のプロセスについて科学的に考察したものである。ただし、本論文は研究開発モデルを論ずることを意図したものではないことをここに断っておく。とはいえ、一言述べておく。研究開発モデルにおいてアメリカは概してとくに20世紀前半期はリニアモデルであったと指摘される。このリニアモデルは俗に基礎から応用、開発へと一方的に展開していくものと捉えられている。だが、本論文で示されているように、その研究開発プロセスは相互に関連し影響しあっており、前述のような形式論的な俗論的理解とははなはだ異なっていることを付記しておく。

キーワード

研究開発，企業内研究所，X線管，白熱電球，実験装置，Coolidge，Langmuir

* 立命館大学経営学部 教授

目 次

- I. はじめに
- II. GE 研究所におけるフィラメント素材・白熱電球・X 線管の開発と研究連携について
 - 1. 次世代白熱電球開発と GE 研究所におけるタングステン・フィラメント材料の開発
 - 2. Langmuir を研究所へと導いた白熱電球に潜む問題
 - 3. Langmuir による白熱電球を装置と見立てた基礎研究
- III. 白熱電球開発の成果を基礎にした Coolidge による X 線管の開発
- IV. 第一次世界大戦から戦後にかけての X 線管の発達
- V. X 線散乱実験を一新させた新しい X 線管の科学研究への導入とコンプトン効果の発見
- VI. まとめ

I. はじめに

GE 研究所 (General Electric Research Laboratory) は、1900 年に創設され、数々の研究・開発の成果を上げ、また I. Langmuir や I. Giaever らのノーベル賞受賞者を出した、アメリカで最初の企業内研究所であることはよく知られている。GE 研究所は、端的に言えば所長職を務めた C.P. Steinmetz や創業者の一人である E. Thomson らによって指摘されている、新分野への投資と開発のためには研究所機能が不可欠だとの意向に基づいて設けられた。

GE 研究所に関する先行研究としては G. Wise のものがある。彼は、GE 研究所長 R. Whitney が科学と産業のはざままで発揮した多彩な指導的手腕を研究所での出来事を中心に伝記的描写を行い、例えば Langmuir は W.D. Coolidge に熱電子理論を得心させたこと、X 線管を軍用携帯装置とすることを請け負ったこと、電球の黒化の原因分析などについて言及し、その上で所長 Whitney の組織マネジメントの手腕や製品開発上の GE のビジネスの特質について語っている¹⁾。L.S. Reich は、GE と Bell における産業的研究とビジネスがどのように形成されたのかを取り上げ、例えば Langmuir の研究者としての能力・性格を、商業的利益に結びつく研究領域や実験を有効な科学的原理を発見することで前進させる「強力な産業的研究者」として評価し、その優れた研究方法は複雑多岐な分析力にあるとその研究能力に注目し、興味ある記述を展開している²⁾。小論のテーマとの関係でより注視すべきは以下のような視点である。すなわち、これまで企業内研究所を含むアメリカの研究・開発の評価について

1) G.Wise, *Willis R. Whitney, General Electric, and the Origins of U.S. Industrial Research*, Columbia University Press, 1985. とくに 154-156, 176, 179 を参照されたい。

2) Leonard S. Reich, *The Making of American Industrial Research*, Cambridge University Press, 1985. とくに 122-124 を参照されたい。Reich と類似した評価はこれに先行する P.W. Bridgman に見いだされる。Bridgman は、Langmuir の仕事は物理学、化学、工学に渡っているけれども、Langmuir は技術者ではなく化学者もしくは産業的研究者であると、Reich とは多少異なるが組織指導性や研究能力の部面から分析している；P.W. Bridgman, *Some of the Physical Aspects of the Work of Langmuir, Collected Works of Irving Langmuir* (ed. C.G. Suits), 1962。

は、V. Bush の『科学—果てしないフロンティア』³⁾ に代表されるような純粋科学が新しい技術を生み出し豊かな明日の世界をもたらすとのリニアモデル型の研究・開発の礼賛説が説かれてきた。これに対して、近年 R. Buderer や R.S. Rosenbloom & W.J. Spencer らのこうした論調を否定する見解が提示されている。例えば Rosenbloom & Spencer, 『中央研究所時代の終焉』は GE 研究所の研究制度・組織面に関わって、GE 研究所所長 Whitney は産業的利益につながる応用開発研究と学術研究指向性の強い基礎研究の二面性を同時に実施できるように努めたと指摘している。しかしながらその記述は概して 20 世紀の後半にあらわになった研究・開発の組織上の問題は、世紀前半期において経験的につくられたとして、基礎科学への投資は新技術を生み出すとの「誤解」が元になって引き起こされたのだと、歴史通貫的に捉えて GE 研究所などの初期の成果の独自性を見落としかねない分析視点をとっている⁴⁾。

筆者は上述のような Buderer や Rosenbloom & Spencer らの視点とは異なって、もちろんフロンティア論を説くものではないが、初期の研究活動とその成果が持つ独自のあり方を適正に評価する立場から検討することで、当該時代の研究・開発というものの特質を明らかにしたい。すなわち、初期の電気工業が新しい段階を迎え技術をより高度なものへと進化せざるを得ない時代だからこそ、また科学の理論部門と実験部門とが一層相対的に自立していった歴史的な時代だからこそ、GE 研究所は大学などの研究室とは異なって、技術開発を目的とした基礎研究と応用研究、開発研究の各研究成果を相互に密接に関連させ、そして GE は企業として民生用をはじめ軍への協力、科学研究の実験部門からの要請への対応など、各方面からのそれぞれに際立った技術的要求に対して柔軟かつ的確に対応し、これらを迅速に実現したのである。

小論の基本的な内容構成は次のようなものである。GE 研究所で開発された X 線管は 1920 年代になって X 線の粒子性を検出し（コンプトン効果の発見）、量子力学形成において一つの画期をなす実験的成果をもたらした。もちろんこの X 線管の開発は直接的には A.H. Compton の科学の側の要請があつて造られたのだけれども、以下のような GE 社の白熱電球、つづく X 線管の開発が推し進められることで実現されたわけで、産業技術を基礎にした技術開発の成果が科学研究に大きな進歩をもたらしたものだといえよう。すなわちこの X 線管は従来型の X

3) V. Bush, *Science—the endless frontier*, United States Government Printed Office.

4) R. Buderer 『世界最強企業の研究戦略』, 日本経済新聞社, 2001 年; 原著 *Engines of Tomorrow*, 2000.

R.S. Rosenbloom & W.J. Spencer 編, 『中央研究所時代の終焉』, 日経 BP 社, 1998; 原著 *Engines of Innovation*, 1996. とくに 32-40 を参照されたい。

これら二書は次のような考察も加えている。GE 研究所における経営と研究に的確な配慮や対応ができる研究リーダーの役割や、研究・開発組織を企業内に内部化することでマーケティングと同様に研究・開発投資を行うようになってきたと。

なお、X 線管等の歴史的考察としては日本電子機械工業会電子管史研究会編『電子管の歴史』(オーム社, 1987) や、青柳泰司の『医用 X 線装置発達史』(恒星社厚生閣, 2001) がある。これらは X 線管の X 線発生機構を順次記しているにすぎなく、フィラメント素材の開発や X 線管の白熱電球開発を基盤にした、構造的な研究・開発の歴史叙述とはなっていない。

線管を改良するとういよりは、これに重要な役割を担った Langmuir の白熱電球を対象とした基礎的な科学研究 (表面化学) を基礎に開発された。ここに見られる科学研究と技術開発の一連の過程には研究成果が相互に関連しあいながら相互に絡み合いながら、つまり企業内研究所ならではの組織的研究だからこそより効果的に成果を上げていく部分が見られる。また研究の成果が相互に絡み合うということは、研究者間の研究成果の認識が連関するというに加えて、対象とする各種の装置—電球、X 線管—はそれぞれ同一型、類似型、発展型のものであったりするのであるが、これらを対象とする研究者の装置の内的構成・状態の意味づけは互いに異なるものの多角的に装置を媒介に連関し合っている。この小論の課題はこのような研究・開発の特徴を明らかにすることにある。

II. GE 研究所におけるフィラメント素材・白熱電球・X 線管の開発と研究連携について

X 線管技術の発達が発達が X 線散乱の科学研究を新しい段階へと押し上げたのだが、この新しい X 線管はどのように生み出されたのか。端的に言えば、それは前世紀から次第にその技術を高度なものへと展開していた電気技術、より実体的に言えば白熱電球工業において展開されていた電球という製品技術の開発研究、ならびにその電球を科学実験装置とした目的的な科学の基礎研究による。つまり白熱電球の内的構造、それを構成する材料とその加工・製造に関わる研究・開発の進展・蓄積が、新タイプの X 線管や作動の安定した電子管を生み出すのに大きな役割を果たした。

1. 次世代白熱電球開発と GE 研究所におけるタングステン・フィラメント材料の開発

GE 社は炭素フィラメントの特許切れ対策として、新たなフィラメントを求めてタングステン・フィラメントの開発を行った。というのもアメリカ国内での電球の製造量は 1881 年 3.5 万個であったものが、その後急速にのびて、1914 年には 1.1 億個となり、同じ年に世界全体で 2.5 億個となった⁵⁾。これらの数字が示すように、20 世紀の 10 年代にかけての白熱電球工業は成長産業であった。炭素フィラメント製白熱電球の当初の特許権はすでに期限切れであった。GE 社にとっての緊要の課題は次世代の金属フィラメント製白熱電球の開発であった。実際 GE 社は 1905 年 GEM (金属化カーボン) 電球を実用化したが、翌年金属フィラメントのタンタル電球の実用化という事態を前に、特許を持つドイツのジーメンス・ハルスケ社 (Siemens & Halske Company) からタンタル・ワイヤを 25 万ドルで購買する権利を取得するか、オーストリア人発明家 Kuzel のタングステン特許を 50 万ドルで取得するか、外部に頼って先に進め

5) G.F. Morrison, The Electric Lamp Industry, *General Electrical Review*, 18, 1915, 497-503.

るといふ話もあった⁶⁾。そうした状況下でやがて X 線管開発に結びつく、いうならばドイツの技術などを凌駕する、より進んだタングステン電球の開発が 1905 年スタートしたと Coolidge は記している⁷⁾。

さて、GE 社のタングステンの冶金技術面は、所長 W.R. Whitney や主任研究員 Coolidge によって進められた。最初の金属フィラメント材オスミウムは、融点は高いが加工が難しく高価過ぎた。ニオブやタンタルがジーマンス・ハルスケ社の化学者 W.V. Bolten（オストワルド研究所の学生で W.H. Nernst の助手）によって試された。タンタルは融けにくく、コストを炭素フィラメントの半値にする可能性があり、前述のように好ましかった。プラチナも試されたが融点に問題があり、炭素のように発光する前に融けてしなびてしまう。タングステンもフィラメント材料の候補として上げられた。しかしながら通常きめ細かな粉末をペーストと混ぜて、ダイスから噴出させてワイアに加工するのだが、そのプロセスには困難性があった。とはいえタングステン是最も機能的、コスト面から適していた。しかもこれまでの炭素フィラメントは 50 時間で発光効率は半分に減ずるが、タングstenは 500 時間経過しても 80% 弱の効率を維持するものであった⁸⁾。

1906 年に Coolidge はタングステン製フィラメントの電球を開発していたが、そのフィラメントそのものの製造に大きな問題を抱えていた。タングstenは硬くもろかった。けれどもモリブデンに比して、延性はあまり変わらないものの酸化物の塩や酸に侵されにくかった。やがて 1910 年 C.G. Fink が、タングsten原鉱の鉄マンガン重石 (wolframite) を物理的 (電気的)・化学的手法で純化させて、1/1000 の径までの加工に成功した⁹⁾。

Coolidge は「展性をもつタングsten」と題する報告で、C.G. Fink のデータを紹介しつつ機械的作業と化学的精錬を実現することでタングstenが延性をもつようになると記している。すなわち銅の場合はわずかのビスマス (熱い場合は 0.02% か冷たい場合は 0.05%) ないしは硫黄 (0.25%) を含んでいると、あるいはニッケルがヒ素や硫黄をわずかに (0.1%) 含んでいると、展性をもちやすく可鍛し易くなる。確かに純度が高いと展性をもつこともあるが、異なる元素が入っていると屈曲し操作し易くなる。これに倣ってタングstenに展性をもたせた。こうしてタングsten・フィラメント電球は 1910 年造られた。なおこの作業は研究所の約 20 人の固い絆で結ばれた化学者と、工場からの機械作業や電気作業に長けたアシスタントとの共

6) G. Wise, *op.cit.* 1), 122-123。

7) W.D. Coolidge, The Development of Modern X-ray Generating Apparatus, *General Electric Review*, 33, 1930, No.11, Part.I, 608-614; Part.II, 723-726。

8) W.R. Whitney, Metal Filament Lamps, *General Electric Review*, 9, 1907, 55-58. Whitney は、効率は 15 倍もよいと述べている (W.R. Whitney, Some Chemistry of Light, *General Electric Review*, 13, 1910, 105)。

9) C.G. Fink, Ductile Tungsten and Molybdenum, *General Electric Review*, 13, 1910, 323-324。

同、また白熱電球工場のスタッフらの力の結集によって実現されたと記されている¹⁰⁾。

後に Coolidge は 1912 年 6 月の報告「金属タングステンとその応用について」で、そのフィラメント素材としての長所について検討を加えた。これまでプラチナがよく用いられてきたが、タングステンの高い比重 (金と同程度の 19.3)、高い融点 (プラチナ 1,755℃、タングステン 3,000℃、この数値は今日知られている数値 3,400℃より低い)、高い熱伝導性 (銅の 0.37 倍であるもののプラチナの 2.2 倍)、高温下での低い蒸気圧を考えて、X 線管の陽極かターゲットにふさわしいと記している¹¹⁾。

2. Langmuir を研究所へと導いた白熱電球に潜む問題

さて電球の機能性を改善するためには新たなフィラメント素材の電球内での作動を解決することが大きな課題となるのだが、このことに気づいたのが I. Langmuir である。彼はコロンビア大学で冶金工学を学んだ後、ドイツのゲッティンゲン大学の W.H. Nernst のもとで、高温・低圧下での熱いプラチナ線あるいはネルンスト・グロー (酸化ジルコニウム) によって生起する気体の解離現象を対象にした研究キャリアを持つ若き研究者であった。

回想記によれば、前述のように研究所はタングステン・ワイアの開発に集中していたが、所長 Whitney は研究所に訪れた Langmuir に対して最も興味を抱いた事柄がどのようなのかを知らせるように求めた。これに対して Langmuir は解決しなければならない当面の課題はガス中のワイア内の不純物に大きな問題があると考え、さまざまなタイプのワイアを高真空中で加熱し、それぞれのケースで得られるガスの量を調べることを提案した。実際これを試したところフィラメントの体積の 7,000 倍の量のガスを得たという¹²⁾。

GE 研究所は企業内研究所ではあったが、電球問題の核心をつきとめた Langmuir にとって、研究所はこれまでの研究の連続性を保証しえるもので、Whitney の提案を受け容れて研究所での仕事に携わることにした。GE 研究所は要となる気鋭の研究人材を得た。

ところで、Langmuir の GE 研究所入所は、タングステン・フィラメントの開発が最終段階にあった 1909 年のことであるが、所長 Whitney や主任研究員 Coolidge にとって電球は新製品開発の技術的対象であったけれども、彼自身の問題意識としては、電球は格好の実験装置に見えたのだった。前述で触れたようにおびただしい程のガスが採取されることに限りない謎を見出したわけで、そこに直接的な動機が示されている。電球はその内部に出現する原子・分子

10) W.D. Coolidge, Ductile Tungsten, *Transaction of American Institute of Electrical Engineers*, 29, 1910, 961-965.

11) W.D. Coolidge, Metallic Tungsten and Some of its Applications, *Transaction of American Institute of Electrical Engineers*, 31, 1912, 961-965. なお、タングステン・ワイアの量産的製造法については J.W. Howel が記している; *The Manufacture of Drawn Wire Tungsten Lamps, General Electric Review*, 17, 1914, 276-281.

12) Atomic Hydrogen as an Aid to Industrial Research, *Science*, 67, 1928, No.1730, 201-208.

の解離、蒸発、吸着など、稀少な部品材の元素の特性とそれらが特異な状態でもし出す、ミクロスコピックな現象の調査、検討を可能とする実験装置手段といえるものであった。このように同じ対象（電球）とはいえ、研究グループのメンバーのそれぞれの目的意識、価値づけ方によって、互いに関連し合いながらも位置づけは異なっていた。初期の GE 研究所の組織性、研究人材の卓越性が指摘される。筆者はここにメンバー間において研究内容面で独自性を保ちつつ多角的に絡み合い多彩な成果をつくり出す、企業内研究所の研究・開発の特質を見出す¹³⁾。

なお、Langmuir が GE 研究所を選んだのには研究所の研究環境にもあった。彼がニュージャージーのステューブズ工科大学 (Stevens Institute of Technology) にいた頃は支援者はいなく自前でやる他はなかった。けれども GE 研究所では Whitney によって特別にあつらえられた¹⁴⁾。前述の実験で支援したのは A.H. Barnes であるが、Langmuir の実験的研究に欠かせない巧みな器具製作人 S.P. Sweetser や、ワイアの製作支援を行った J. Bishop らが支援した。例えばプラチナ・ワイアの製作にあたっては純粋なプラチナを径 0.020inch、長さ 20 フィートのワイアにした上で、それをダイヤモンド・ダイスによって引き出して径 0.10, 0.005, 0.0027, 0.0016inch のワイアを製作し、あるいは測定では、水素中や水銀蒸気中のタングステン・ワイアからの対流について、例えば温度 273, 473, 673, 873, 1,073, 1,273, 1,500, 1,700, 1,900K まで約 200 度刻みで、抵抗、ワット (w)、電流などをきめ細かに測定した¹⁵⁾。実験装置の細工のみならず精密測定技術や材料加工技術など、相対的に高度な技術展開を進めていた GE 研究所には、高温・高真空下での様々な希少物質の未知の特異な現象を垣間見ることのできる、他に類を見ない研究基盤と、また研究対象とする実験装置としての電球とそのバルブ内の実験条件を的確に調整する手腕と技術が提供されうる支援環境があった。

3. Langmuir による白熱電球を装置と見立てた基礎研究

入所した Langmuir がまず取り組んだ研究は、1904 年 Nernst の示唆によって始められた、ネルンスト・フィラメントのグローによって生じる窒素酸化物の形成を取り扱った学位論文を引き継いだ、ガラス容器内の高温状態のガスの熱伝導と対流に関するものであった¹⁶⁾。彼は 1911 年この成果を発表した。それはフィラメントをタングステンに代えて、空気（窒素、酸素）や水素を取り込んだガラス容器内（直径 4cm）のフィラメント・ワイアの位置やその太さの違

13) 先行研究での GE 社研究所の評価は、例えば、ホイットニーは研究所を「科学研究指向の組織」としたとか (Rosenbloom & Spencer, *op.cit.* 4), p.38), あるいは彼は「研究所の精神」の重要性を説き、「有能な研究者を導く役割」を果たすことで、研究所の中に「少数の才能ある人材の働きが基盤」としてつくられたのだと (Buderi, *op.cit.* 4), pp.94, 96)。

14) G.Wise, *op.cit.* 1), 151-152.

15) I. Langmuir, Convection and Conduction of Heat in Gases, *Physical Review*, 34, 1912, 401-422.

16) I. Langmuir, Thermal Conduction and Convection in Gases at Extremely High Temperatures, *Transactions of the American Electrochemical Society*, 20, 1911, 12, 225-242, 特に 232-236.

いが温度の高低によってどう変化するかを調べたもので、その結果はワイアの容器内の位置で低温の場合は違いがあるけれども高温の場合はその効果はほとんどないというものである。これらの観測のうち水素ガスの場合、熱のロスが高温においてワイアの径に依存し、直径 0.069mm 以下の細いワイアの場合、1,200K 以下では熱のロスに対する径の効果はわずかなものだった。他方 2,400K では熱のロスの増し方は半径に一次比例していた。また、温度に対する電力の比は約 1,300K までは比例しているが、温度が高くなると 3,400K まで次第に激しく増えることなどが判明した。翌 1912 年「ガスの対流と熱伝導」の研究を発表し、これまでの研究の到達点を整理した上で理論的実験的検討を行った¹⁷⁾。

ところで、これまでの Langmuir の研究は物理学的な見地からのアプローチをとっていた。だが電球をモデル化したバルブ内に示される新たな特異性を垣間見て、化学的な見地からのアプローチを付け加えた。つまり、これ以前の Langmuir の研究はこのバルブ内のガスの運動が熱のロス等にどのような効果をもたらしているかという課題に対して、気体運動論などの物理学的な運動の様々な形態、たとえば対流 (convection) ないしは伝導 (conduction)、特徴的な物理量としては熱伝導 (heat conductivity) や粘性 (viscosity)、比熱 (specific heat) などによって各種のガスの熱の変動をとらえようとした。しかしながら、水素中のタングステン・ワイアの対流の観測において、電力消費 ($W/la = 39.4 (T/1,703)^{4.74}$ 、ただし l はワイアの長さ、 a はその半径) が 2,300K 以上で気体運動論の見地からの計算値から大きく逸脱することに気がつき、その逸脱を水素の原子への解離によると想定したのである。

こうして Langmuir は化学的な反応が電球をモデル化したバルブ内の状態に大きく関与しているのだとの認識に立って、ガスのうちでも特異な振る舞いをする水素を対象に取り組んだ。それが 1912 年 5 月の研究報告「水素の原子への解離」¹⁸⁾ である。これは 1911 年の前述の報告「超高温におけるガスの熱伝導と対流」で扱ったもので、水素中のタングステン・ワイアの温度上昇に伴うエネルギー消費の急速増加は、水素が電離し原子に解離するために引き起こされているのではないかとの想定を検証するために計画されたものである。これは Magnanini & Malagnini (Nuovo Cim., 1897) の窒素の過酸化物の解離現象を参考にしたもので、Langmuir は解離現象の理論的解析を行う一方、200 度ごとに 1,100K から 3,500K の範囲で温度を測定し、他のガスと比較した。例えば、窒素の場合には 3,500K でも多少の解離は引き起こされるものの 5% を超えなかった。これに対して水素の場合は窒素や水銀、二酸化炭素とは異なって、2,100K を超えると急速にエネルギー・ロスを生じ、3,300K ではその値は 4

17) I. Langmuir, *op.cit.* 15), 401-422.

18) I. Langmuir, The Dissociation of Hydrogen into Atoms, *Journal of the American Chemical Society*, 34, 1912, 860-877. 温度や熱損失は、タングステン線を一種の抵抗温度計として見立て、それに電圧計と電流計をつないで、抵抗と温度との関係から温度を、その上で熱損失を割り出したという。

— 5 倍増大した。

(計算値 $W = 2\pi/\ln b/a \int_{T_1}^{T_2} k dT$, ただし k は熱伝導率, 単位は $w/cm \cdot degree$)

この結果から解離現象が引き起こされていると判断した。この検証にあたって, 各種のガスを入れ, これを液体空気で冷却しえるようにした U 管を実験装置のバルブに取り付けて目的通りにコントロールする仕掛けを設けた。

次いで 1912 年 8 月, Langmuir は研究「水素の化学的活性修飾」¹⁹⁾ でこの水素の解離現象の謎, 急速増加のメカニズムにせまった。具体的には, 同様の実験装置を用いて, 圧力や温度を調整して水素を反応性の高い状態にし, それが水素原子に変化し他の気体と化学反応を引き起こし別の物質に転ずる現象を調べた。タングステン・ワイアを 1,300 – 2,500K に熱するとまわりの低圧 (0.001 – 0.020mm) の水素ガスはゆっくりと消滅する。ただし窒素や一酸化炭素の場合は 2,200 度以下では消滅しない。水素は加熱されたワイアに吸収されて消滅したのではなくガラス表面に堆積し, その際にリンをバルブ内に添加すると三水素化リンを形成する。こうした水素の振る舞いから, 水素は原子状態に解離し, 化学的活性をそなえたままワイアを放れて, 冷却されたバルブ内に拡散するか, ガラスに吸収されることが判明した。

このようにして Langmuir は実験装置のバルブ内に引き起こされる現象, すなわち水素を中心とした基本的な化学的運動形態に関する考察を行い, バルブ内の低圧ガスが活性化し様々な状態に変転し, 低圧とはいえ大きな影響をもたらしていることを明らかにした。

Langmuir はこれまでの基礎研究を元にして直接的に電球内の状態を調べる目的基礎研究を含む応用研究へと進んだ。それが 1913 年 6 月「非常に低い圧力での化学反応, II, タングステン電球の窒素の化学的クリーンアップ」²⁰⁾ で, 電球内の少量の低圧水素ガスはフィラメントによって高温に熱せられて, 酸素やフィラメントを構成するタングステン・ワイアと反応し消滅する。ところが, 窒素ガスの場合, タングステン電球内の固体のタングステンとは反応せず, フィラメントから遊離するタングステン蒸気 (単原子) と結合して WN_2 となる。つまり窒素は水素や水蒸気と異なってタングステン蒸気と反応する以前に解離もしくはイオン化を引き起こさない。こうして Langmuir は封入ガスによって電球のバルブ内の状態が異なることを明らかにした。

ついで Langmuir は 1913 年 10 月「高性能タングステン電球, I. タングステン電球の黒

19) I. Langmuir, A Chemically Active modification of Hydrogen, *Journal of the American Chemical Society*, 34, 1912, 1310-1325. 実験装置の工作は S.P. Sweetser による。

20) I. Langmuir, Chemical Reactions at Very Low Pressure. II. The Chemical Clean-up of Nitrogen in a Tungsten Lamp, *Journal of the American Chemical Society*, 35, 1913, 931-945. Langmuir はこの現象の理解にあたって, Soddy が 1907 年 (*Proc. Roy. Soc.*, 78, 429) にカルシウム蒸気が不活性ガス以外のガスと反応することを示したことを同論文中で照会している。またこのように低圧下でタングステン電球内のガスがクリーン・アップされることは, その場合は窒素ガスだったが, G.M.J. Mackay によってすでに明らかにされていた。なお温度測定は数度刻みで測定, 圧力は 1,000 分の数 mm 刻みで測定している。

化とその防御方法」²¹⁾ で白熱電球のエネルギー効率の問題について検討した。電気エネルギーの熱エネルギーや機械的エネルギーへの転換はこれまで 90% の効率性を達成していたのに、白熱電球等のランプ光源について言えば非効率であった。最初の炭素白熱電球は平均的な基準で 1 キャンドル当たり 5.6w も消費していた。その後 3.1w に減じ、金属フィラメントの使用によって 2.5w、さらにタングステン電球の登場によって 1 から 1.25w まで減じた。

タングステン電球はサイズが大きくなるほど効率的に作動するが、原理的に効率はバルブの黒化に依存する。すなわち水蒸気、二酸化炭素、一酸化炭素、水素、窒素、炭化水素ガスなどの電球のバルブ内にあるガスの中でも問題のあるガスは、これまでの研究で明らかのように水蒸気である。水蒸気はタングステンを酸化させ原子水素へ還元される。生じたタングステンの酸化物は揮発しバルブに堆積し、そこで原子水素によって還元されて金属タングステンになる。こうして再び水蒸気が生成しふりだしに戻る。この反応はサイクルとなって繰り返し引き起こされ黒化が進む。Langmuir は、このサイクル反応における水蒸気の役割を確かめるために、電球に見立てたバルブに取り付けた側管に水を入れ、これを固体の二酸化炭素とアセトンで -78℃ に冷却し、水蒸気圧 0.0004mmHg でも黒化が引き起こされることを巧みな手法を工夫して検証した²²⁾。

こうした分析から排気が不十分な電球は短命で、よく排気すれば電球黒化の原因は除去される。しかしながら液体空気にバルブを浸し水蒸気がフィラメントに触れないようにしても黒化は進んだ。要するに電球黒化の真の原因は温度にも依存するがフィラメントの蒸発にあった。これを防御する方策は、窒素や水銀、アルゴンのようなガスを封入し、そのガスの対流によって堆積の位置を変えバルブを黒ずませないことだと結論づけた。Langmuir はここに黒化を除去する方策をみ出し、窒素で満たされたタングステン電球を発明したのだった²³⁾。

ついで Langmuir は 1913 年「金属性タングステンの蒸気圧」と「金属プラチナとモリブデンの蒸気圧」と題する論文を相次いで発表し、タングステン材料の特性を分析し、他の金属材料よりもすぐれていることを検証した。タングステンの場合、融点近くの 3,540K ではさすがに蒸気圧は 0.080mmHg となったものの、2,400K で 5.0×10^{-8} mmHg、2,700K で 6.9×10^{-6} mmHg であった。また白金は 1,850K ですでに 8.8×10^{-6} mmHg、2,000K で 1.07×10^{-4} mmHg、モリブデンは白金よりは数値はよかったが、2,200K で 3.96×10^{-5} mmHg、2,400K で 1.027×10^{-3} mmHg であった。タングステンの蒸気圧の数値は白金やモリブデン

21) I. Langmuir, Tungsten Lamps of High Efficiency - I. Blackening of Tungsten Lamps and Methods of Preventing It, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 32-2, 1913, 1913-1933.

22) I. Langmuir, *ibid.*, 1913-1933.

23) I. Langmuir, Tungsten Lamps of High Efficiency - II. Nitrogen-Filled Lamps, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 32-2, 1913, 1935-1946.

よりもその値が小さく、フィラメント材料としてのタングステンの優位性を示していた²⁴⁾。このように Langmuir の研究は白熱電球のバルブ内を対象とし、この内部を探る巧妙な実験装置をあつらえ、ここに生起する現象を当初は物理学的な見地から分析した。だが、熱のロスが水素の原子への解離にあるのではないかとの想定、すなわちこの水素の特異な振る舞いを見出したことを契機にバルブ内の原子・分子のそれぞれの新しい特性を化学的な見地から追跡することへと転じ、効果的な電球の素材構成と内的状態を明らかにした。

このような Langmuir の考察は、白熱電球の製品開発研究としての目的基礎研究を含む応用研究ともいえるけれども、白熱電球を契機とした新たに開拓された表面化学で基礎研究ともいえる、二面性を備えたものである。

III. 白熱電球開発の成果を基礎にした Coolidge による X 線管の開発

これまでとは異なる新しい X 線管は電極をタングステン素材をフィラメントとしたもので W.D. Coolidge によって開発されたが、それはまた Langmuir の白熱電球を対象とした研究成果の元に結実したものであった。

その開発の出発点は 1912 年の Coolidge の報告「金属性のタングステンとそのいくつかの応用」²⁵⁾に始まる。それによれば従来 X 線管は通常プラチナが最適なターゲットとして見なされ、これを水冷したり熱伝導性の大きい銅片でおおう工夫をしたりしていたという。しかしプラチナは融点 1,755°C で X 線管の特性に限界を設けるものともいえた。これに対してタングステンの融点は 3,000°C を超え、Langmuir の測定に示されるように金属中で最も気化しないこと、またタングステンの融点でのエネルギー放射は 1 平方 cm 当たり 375w、具体的にはディスク径 3cm、厚さ 0.2cm のタングステン・エネルギー放射は 5kw 余りで、これはプラチナのその 20 分の 1 に過ぎない。これらのタングステンの優位性を、Coolidge は High specific gravity, High melting point, High heat conductivity, Low vapor pressure at high temperature の四つにまとめ、念入りに仕上げられたタングステンは X 線管のターゲットとしてふさわしいと結んでいる。

そして翌年 Coolidge はタングステンをターゲットにした X 線管を開発した。それは 10kw 機械式整流器や変圧器と連携した、陰極と対陰極に精錬されたタングステンを用いた高真空の X 線管であった。Coolidge はこの開発の際に上記に加えて次のような Langmuir の示唆に基

24) I. Langmuir, The Vapor Pressure of Metallic Tungsten, *Physical Review*, Second Series, 2, No.5, 1913, 327-342; The Vapor Pressure of the Metals Platinum and Molybdenum, *Physical Review*, Second Series, 4, No.4, 1914, 377-386.

25) W.D. Coolidge, Metallic Tungsten and some of its Applications, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 31-1, 1912, 1219-1228.

づいて設計したと述べている。「高真空中のタングステン製熱陰極は温度に依存した、ある決められた割合で電子を供給すること、また高電圧、少なくとも 10 万 v 以上では決してこの放出割合に影響は出ない」と²⁶⁾。

この点に関わって Langmuir は同年、論文「高真空下の熱イオン電流の空間電荷と残留ガスの効果」²⁷⁾ で次のような検討と分析結果を示していた。バルブ内のガスを一掃し、高真空状態にしたらフィラメントからの電子放出はどのようになるのか。この研究は、炭素製もしくは金属製のフィラメントが真空中で熱せられ、それが正に荷電された金属シリンダーで囲まれると電子が熱い金属固体から放出される、端的に言えばエジソン効果のより正確な理解を目指すものであった。Langmuir は、電子の相互反発力(空間荷電)は正イオンを奪い、その結果熱い陰極から冷たい陽極への電流の流れが限定されることを理論的、実験的に示した。バルブ内に低圧ガスが存在すると一般的に白熱金属からの電子放出は大きく減少する。特にその効果は低温では顕著であるが、高温ではこの効果は消滅すること、タングステンからの通常の熱電子流は Perfect な真空内においてリチャードソン式に合致すること、またタンタルやモリブデン、プラチナ、カーボンの場合には、ガスの効果は電子放出を大きく妨げること、加えてタングステンからの熱電子流を抑制する窒素ガスの効果は陽極の電圧に依存し、酸素の効果も同様であること、また飽和電流を変化させるガスの効果はワイヤ表面の不安定な複合物の形成によることなどを示した。結論的に Langmuir は Pring & Parker (Phil. Mag., 23, 192, 1912) の熱電子流を二次的効果と見なす見解や、Lilienfeld の正イオンは高真空下の電気伝導に本質的な役割を果たすとの見解を引き合いにして、適切な事前の対策があれば高真空 (10^{-6} mm) 下の白熱固体からの電子放出というのはその物質の重要な特性で、その他の二次的な原因にはよるものではないとの見解を適正とした。

ここに Coolidge の X 線管の原理が見て取れる。すなわちフィラメントを備えた熱陰極から熱電子ビームを放出させて、これを陽極ターゲットに衝突させ X 線を生み出す。確かに、これは熱電子放出理論という科学的原理を技術として具現化したものであるが、Langmuir は電子放出が高真空、高真空下では何の問題なく実現され、10 万 v 以上の高電圧においても同様に放出することを検証したのだった。これまで冷陰極型 X 線管では封入ガスの放電で生じた気体の陽イオンを陰極へ衝突させて電子を放出させていたのだが、封入ガスは不要なものであることを示し、これを機に X 線管の高性能化は急速に図られることになった。

Coolidge による X 線管の開発は、単にタングステンの特性を生かしターゲットや陰極フィ

26) W.D. Coolidge, A Powerful Röntgen Ray Tube with a Pure Electron Discharge, *Physical Review*, Second Series, 2, No.6, 1913, 409-430.

27) I. Langmuir, The Effect of Space Charge and Residual Gases on Thermionic Currents in High Vacuum, *Physical Review*, Second Series, 2, No.6, 1913, 450-486.

ラメントに用いただけではなかった。それは、前項で示した Langmuir が 1913 年までに GE 研究所で白熱電球の改良を目的にこれを装置と見立てた基礎的研究の成果に基づいた、高真空下の熱電子放出を集約的に応用したものだ。

その後、X線管はその機能をより効果的に発揮するために必要な改良がおこなわれた。その最初的一端は以下のようなものである。1914年2月、Coolidge が GE 社の紀要に記載しているところによれば²⁸⁾、第一に、放出される熱電子が集束するようにタングステン・フィラメントやフィラメントと同心のモリブデン製の円筒で囲んだ。第二に、結線の仕方を工夫し、熱を逃すためにフィラメントを耐熱性のある熱伝導率のよいモリブデン製のワイヤにつないだ。第三に一方の陽極については重量 100g の単一のタングステンで構成し、そのリード線に過剰に熱が流れないようにするために熱伝導率のよいモリブデン製リングを 3 つ取り付け付けた。またジャーマン・ガラス製のバルブの排気は真空ポンプとのつなぎを広く隔たりを短くして、タングステン陽極やモリブデン素材を真空炉で焼いた後に Gaede の分子ポンプを用いて排気し、大きな放電電流を 1 時間バルブにかけて、吸着しているガスを除き、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ mmHg 以下まで排気した。なお、電源は Röntgen Apparatus Co. 製の 10kw の Snook の装置、一次電源は 150v、60 サイクルの交流を用いた。

こうした過熱対策や排気のための一連の周辺機器との連携によって、一応 X 線ビームを数時間にわたって強度・貫通力において十分な、かつ容易に感知しうるような変動もなく生み出すことが基本的に可能になった。しかもバルブは何のガラス蛍光も示さなかったという。

IV. 第一次世界大戦から戦後にかけての X 線管の発達

Coolidge 管は前述のような基本的な原理的改善をしつらえたものだが、Coolidge 管にはなお改善しなくてはならない点があった。Coolidge 以前の熱陰極 X 線管としてはすでに Wehnelt & Trenkle (1905 年)、Lilienfeld & Rosenthal (1912 年) のものもあった。しかし例えば Lilienfeld 管は 1915 年頃から商業生産されて 10 年ほど命脈を保ったが、その熱電子放出機構ならびに X 線発生機構は多少複雑なものであった。これに対して Coolidge 管は次のような改善を図ることでやがて支配的となった²⁹⁾。

改善の基本問題は X 線管の電気系統の管電流や真空の達成度というよりは連続使用の実現にあった。ちなみに管電流について言うと、Röntgen の X 線管は、推定で管内圧 10^{-3} mmHg、

28) W.D. Coolidge, A Powerful Röntgen Ray Tube With a Pure Electron Discharge, *General Electric Review*, 17, 1914, 104-111.

29) W.D. Coolidge, The Development of Modern X-ray Generating Apparatus Part I, *General Electric Review*, 33, No.11, 1930, 608-614.

80 - 100kv, 管電流 2 - 3mA で、ちなみに当時の高電圧電源としては起電機とライデン瓶によって 150 - 200kv, 管電流 2 - 3mA を実現していた。ところが管電流は 1910 年代になると転機を迎え、1911 年タングステン板を銅製陰極に埋め込んだ陰極が用いることで管電流 50mA を実現した³⁰⁾。後述する Compton が使用したタングステン・ターゲットの GE 社から提供されたクーリッジ管は、高圧電源は直流変換の工夫をほどこした 10kw 段階変圧器の Snook の X 線装置で、バルブにかかる最大電流は 30mA であった。これらの管電流の数値を見ると、Röntgen の X 線管などの初期のものは別にして、管電流の数字は 1910 年頃と 1920 年頃とで余り変わりはない。この 10 年間の X 線管の発達は、電流の安定性を含む、一様な X 線を望み通りに提供する X 線管の安定した連続使用の実現にあり、この点を Coolidge 管は成し遂げたのだった。

さて連続使用の問題は、負荷電圧の安定性もあるが、ことに高温の熱の回避をどうするかにあった。そのため管球は電極の過剰な熱を回避し高温に耐えるために球状をなすのが普通だ。またその径を小さくすることは困難なことであった。Coolidge の報によれば、1913 年に開発されたものの径は 18cm, 1914 年に開発されたものも、この熱を回避するためにリード線にリングをしつらえたものの、やはり 18cm あった³¹⁾。

この課題克服に応えたのが第一次世界大戦によって必要性が奇しくも生じた軍事携帯用の X 線管の開発であった。Coolidge は 1918 年 1 月、軍用に開発した携帯可能な熱陰極 X 線管の概要を報告している³²⁾。ちなみに 1915 年に開発されたものに熱回避に水冷のものがあつたが携帯には不向きであった。この 1918 年のものは次のような改良を施すことで解決した。第一は、陽極を先の 1914 年のそれに比してより大きな熱容量、熱伝導性を持つターゲットにし

30) 青柳泰司, *op.cit.* 4), 10-11, 18. ただし、高電圧測定は針端ギャップで空気のイオン化のため正確な測定が難しく、これが正確なものになるのは 1815 年以降、球ギャップになってからである (青柳, *ibid.*, 30)。

バルブを排気する真空ポンプについて言うと 1905 年頃にはかなりの水準に達した。W. Gaede は研究用真空管を排気することを目的として水銀封止回転型ポンプ (ポンプ内の回転ドラム吸い込み口を水銀に浸すことで封止して排気する) を開発し、0.00005mmHg を達成した。^(*)1) また後に油回転型 (1909 年) や水銀拡散型のポンプ (1915 年) を開発した。Langmuir は Gaede のそれをドイツから輸入し利用したが、やがてこれを水銀蒸気を冷やし凝結させて排気する効果的な凝縮ポンプを開発した。^(*)2) なお S. Dushman によれば、達成真空度は、スプレングル・ポンプは 15 分で 0.000165mmHg, 30 分で 0.000069mmHg, ガイスラー・テブラーポンプは 24 分で 0.0254mmHg, 300 分で 0.000025mmHg の真空を実現し、そしてこれら手動式に対して Gaede の水銀封止回転型ポンプは、15 分で 0.00023mmHg, 30 分 0.00007mmHg の排気能力を備えている。^(*)3) ; (*1) W. Gaede, Demonstration einer Rotierenden Queck-silber luftpump, *Physikalische Zeitschrift*, 6, 1905, 758-760; (*2) S. Dushman, The Production and Measurement of High Vacua. Part III Methods for the Production of Low Pressures, *General Electric Review*, 23, 1920, 672-683; (*3) S. Dushman, The Production and Measurement of High Vacua. Part II Methods for the Production of Low Pressures, *General Electric Review*, 23, 1920, 605-614.

31) W.D. Coolidge, A Powerful Röntgen Ray Tube with a pure Electron Discharge, *General Electric Review*, 17, 1914, 104-111.

32) W.D. Coolidge, A New Radiator Type of Hot-cathode Röntgen-ray Tube, *General Electric Review*, 21, 1918, 56-60.

て熱耐性を高めた点にある。すなわち純銅製の陽極ターゲットのヘッドにタングステン・ボタンを真空中で鑄込んだ。その重量は 860g, 熱容量は 81cal である。この熱容量は既存のモリブデン軸のタングステン・ターゲットの熱容量 10cal 程度に比して数倍であった。第二は、陽極の銅製の軸を熱伝導のよい銅製のラジエーターに結びつけ、輻射熱を逃がす工夫を施した。こうすることでバルブ径を従来のものに比して 9.5cm に絞ることが可能となった。第三に、バルブの排気は 3 つの段階に分けて行ったが、最初に水素を充満させ、強熱することで以前に比して排気が簡易になった。こうして第一次世界大戦の必要性から軍事医療目的に合う携帯用のコンパクトな管球が開発された。

実際 GE 社の戦時の成果報告として次のような記述が記されている。1917 年のドイツへの宣戦布告を機に、GE 社 E.W. Rice 社長は大統領に社の全設備を戦争遂行のために提供することを即座に電報を打った。実際 GE 社は年当たり 25,588 万ドルにのぼるビジネスを展開したが、その 95% は直接的にせよ間接的にせよ戦争に関わるものだったという³³⁾。GE 社の報告には、Langmuir の白熱電球に始まる高真空下の電気放電の「純粋な学術的研究 (purely academic research)」は、クーリッジ管の基礎となる原理を見出し、「戦争の勝利に役立った」とある³⁴⁾。その注目すべき貢献の一つに携帯用の X 線検査装置が以前の重くて、調整がデリケートな上に X 線光は弱いものと区別されて新たに開発された。すなわち軍事医療サービス、携帯用のコンパクトな X 線管が軍事的に要求され、この目的に応える形で装置の開発研究が進んだ。GE 社の報告には戦時期のスケネクタディ研究所の仕事は軍事用外科医療サービスの部門に対して顕著な貢献をなしたと記されている³⁵⁾。

戦後の平時の 1922 年に GE 社で開発されたものは連続使用が可能な水冷であった。この管球の陽極はモリブデンを銅のヘッドに鑄込んだものが使われた³⁶⁾。同年、Wheeler P. Davey は新型の X 線回折装置の開発した。そのクーリッジ X 線管の陽極はモリブデン・ボタンと銅からなるもので、かつ水冷であった。フィラメントの寿命は使用電流 4.75mA で 1,000 時間、管電圧は最大 30kv であった³⁷⁾。また X 線管の電流の安定性も増した。一つ例を上げると、1921 年 W.K. Kearsley, Jr. はクーリッジ管の電流を一定に保持するための工夫を施し電圧を変化させても電流をほぼ 2mA (2.0 - 2.05Mil-amp. の間) に保った。安定装置のないと 3 分間に電流が 10mA から 7.0mA に変動したが、安定装置を使うと 10mA に保持された³⁸⁾。

33) J.R. Hewett, The General Electric Company in the Great World War, *General Electric Review*, 22, No.7, 1919, 493-516.

34) J.R. Hewett, The General Electric Company in the Great World War Part II. RESEARCH WORK, *General Electric Review*, 22, No.8, 1919, 601-607.

35) J.R. Hewett, *ibid.*, Part II, 1919, 601-607.

36) Wheeler P. Davy, A New X-ray Diffraction Apparatus, *General Electric Review*, 25, 1922, 565-580.

37) Wheeler P. Davey, A New X-ray Diffraction Apparatus, *General Electric Review*, 25, 1922, 565-580.

38) W.K. Kearsley, Jr., A New Type of Stabilizer for Use With the Coolidge Tube, *General Electric Review*, 21,

こうして X 線管は軍事的要請も受けて、はからずも連続使用可能なかつ取扱い易いコンパクトな技術として成立した。

V. X 線散乱実験を一新させた新しい X 線管の科学研究への導入と コンプトン効果の発見

GE 研究所は企業内研究所ではありながら、大学等の外部の科学研究の側の要請に応じて科学機器を提供する対応能力を備えるにも到った。その典型的な例が 1920 年代前半に開発された新しい X 線管であった。

A.H. Compton はその実験目的にふさわしい精密な定量測定の方法、高度な X 線散乱実験の手段体系としての各種装置をみつらえていた。鍵となったのはこの新しい X 線管で、これを使用して X 線の粒子性を示すコンプトン効果を発見した。その発見は 1923 年「散乱 X 線のスペクトル」³⁹⁾として報告された。用いられた X 線管はモリブデン・ターゲットであったが、ここで問題は散乱線の中に散乱角に依存する波長のより長い二次線があることを確認しなくてはならない。これを可能とするためにはより精密な測定が必要となった。X 線ビームを石墨の散乱体に照射しこれを X 線分光器の結晶へと導く。その際ビームがブレないように X 線管を散乱体のまわりを回転させ、散乱角を自由に变化させなくてはならない。X 線強度を高めるためにはバルブの径を細くして、陽極端からの距離を縮める他はない。それには陽極の過熱をクリアする必要があった。そこで X 線管は通常の球形のものとは異なる、特別設計の水冷の細長い形状、径 3.5cm にしぼった。この設計によりターゲットと散乱ブロックとの間を可能な限り短く、約 2cm にすることが可能になり、X 線強度は、1.5kw で通常のモリブデン・ターゲットのクーリッジ管に比べて 125 倍の強度を出したと記している。

この X 線管の電極は GE 社によって提供されたものである。注目すべきは、このような実験目的に見合った強力な X 線管が科学研究の側からの要請を得て、金属素材の調達を含む電気工業によって保有する技術の粋を結実させて製作し提供しえたことだ。

以前の 1910 年代前半期の古い X 線管を用いた実験も原子物理学面で大きな成果を上げた。とはいえ、その機能は次のようなもので比較のために示しておく。

例えば Max von Laue や W.H. Bragg の X 線による干渉や結晶解析は、その解析された結晶を回折格子として利用することでより発展的な研究領域を切り開く手立てを得させた。すなわち結晶構造を回折格子にすると以前の H.A. Rowland や A.A. Michelson の回折格子に比べ

1921, 56-60. 青柳によれば、たとえば 1920 年頃の医療用の X 線管で、空冷の場合は 4mA で 8 分、水冷の場合は 5mA で連続使用を実現するに到ったという (op.cit. 4, 72)。

39) A.H. Compton, The Spectrum of Scattered X-Rays, *Physical Review*, 22, 1923, 409-13. A.H. Compton による X 線の粒子性の確証をおこなったコンプトン効果を中心とした研究過程については、R.H. Stuewer, *The Compton Effect*, Science History Publications, New York, 1975. を参照されたい。

1,000 倍も細かくなり、短波長の X 線解析が可能となり、原子内のより深部の電子の規則性を分析することを可能にした⁴⁰⁾。実際 H.G.J. Moseley は Laue や Bragg の研究に触発されて X 線を用いた研究をスタートさせ、その後、可視領域のスペクトルを用いて原子の外殻電子ではなく原子内のより深部の電子の構造解析を行い、N. Bohr の原子構造論の見解を支持するデータを得た⁴¹⁾。

しかしながら、これらの X 線散乱の実験に用いられた一次線源の特性すなわちその強度や波長は一律にコントロールされ、実験・観測に必ずしも見合うものでなかった。前述の H.G.J. Moseley & C.G. Darwin の研究で用いられた X 線源は、白金ターゲットのミュラー (Muller) 管であった。それは Sanax の水銀断続器 (1898 年 N. Tesla の考案) と連携し、コイル (一次側 6A, 二次側 0.3mA) で励起させるものであった。だがミュラー管は管内圧が変動するため不安定に作動する、従来型のガス X 線管に範疇に属するものであった⁴²⁾。つまり問題は、X 線を発生させるためにガスを封入しこれを電離させる原理と、バルブ内面に吸着されているガスが X 線管の作動にともない放出され管内圧を変動させるところにある⁴³⁾。

また上述の Moseley の電子内のより深部の電子を探る実験のバルブの排気は、Gaede の水銀ポンプと液体空気で冷却することで吸着効果を増した炭素ゲッターを用いて排気された。この実験は高速の陰極線によって生じられる特性 X 線の透過能を調べようとしたものだが、X 線管については前述のミュラー管が使われていたのか、管種に関わる記述はない。ただし Moseley は、陰極線の衝撃によってガスが解離したりターゲットの表面が破壊されたりして様々な問題が引き起こされ、その結果として効果的な放電を得られなかったが、随時休みをいれて 3 分から 30 分程度対象となる物質に照射したという⁴⁴⁾。この記述からすると、X 線管の作動はかんばしいものではなく、Moseley は前述と同様の問題に悩まされていたのである。

Compton はこのような以前の古い X 線管の問題性を見抜いていたと考えられる。Compton はすでに 1916 年、これまでの不安定な作動がつきまとう古い X 線管とは異なる、GE 社製のタングステン・ターゲットのクーリッジ管を用いて⁴⁵⁾、その特性の良さを認識し導入していた。

40) E. Segré, 『X 線からクォークまで』174-79 の「X 線が本領を発揮する」と題した項の記述を参照されたい。

41) H.G.J. Moseley & C.G. Darwin, The Reflexion of the X-rays, *Philosophical Magazine*, 26, 1913, 210-232. H.G.J. Moseley, The High-Frequency Spectra of the Elements Part I, Part II, *Philosophical Magazine*, 26, 1913, 1024-1034; 27, 1914, 703-712.

42) The Reflexions of the X-rays, H.G.J. Moseley and C.G. Darwin, *Philosophical Magazine* 26, 1913, 210-232.

43) 館野之男『放射線医学史』岩波書店, 1973, 53-54.

44) The High-Frequency Spectra of the Elements Part, Part II, H.G.J. Moseley, *Philosophical Magazine*, 26, 1913, 1024-1034; 27, 1914, 703-712.

45) A.H. Compton, A Recording X-Ray Spectrometer, And the High Frequency Spectrum of Tungsten. *Physical Review*, 7, 1916, 646-659. なおその高圧電源は直流に変換する工夫を施した 10kw 段階変圧器を備えた Snook-Röntgen machine であった。

実に、Compton をして量子論へと導いた、すなわち光子は電子に衝突し、エネルギーと運動量を交換するという仮説を構想させ、その検証へと進ませることになった 1922 年の Compton の二次線の発生の散乱メカニズムとその本性についての研究で用いられた X 線管は、モリブデン・ターゲットのものであったが、やはりクーリッジ管であった⁴⁶⁾。ちなみにモリブデンはタングステンほどではないが、プラチナより融点は高く、耐熱性・熱伝導性にまさり、タングステンより廉価であった。

それにしても、なぜ Compton は GE 社から X 線管を提供されうるような関係にあったのか。実は GE 社との結びつきは早く、Compton はミネソタ大学に職をえてからも GE 研究所の Whitney との交流を保持し、コンサルタントの役割を担っていた⁴⁷⁾。後に (1917 年) ミネソタ大学からウェスティングハウス電灯会社 (Westinghouse Electric Co.) の研究技術者の職を受け容れ、やがて Compton は NRC (National Research Council 米国研究評議会) のフェローシップを得て⁴⁸⁾、1920 年イギリスのキャベンディッシュ研究所での研究の機会を得た。そしてワシントン大学の物理学の教授の地位に就くことになる。この英国留学の経緯にはウェスティングハウスに留まっていたのでは X 線機器の貧弱な事態を改善しえないのではないかとの思いがあったともいわれている⁴⁹⁾。また、こうした展開の一方で、当時 NRC の物理科学部内に X 線スペクトル委員会 (委員長: ハーバード大学の W. Duane) が設置されていた。Compton は GE 研究所の A.W. Hull と共にそのメンバーで、学术界と産業界の研究者とが相見えた⁵⁰⁾。これは学術行政レベルのことではあるが、GE 社から市販ものとは別に開発された科学研究用に応える X 線管を供与されるような関係にあった⁵¹⁾。

以上、見てきたように、1910 年代前半の Moseley らが使用した X 線管と、1920 年代前半の Compton が使用したのものとは、技術水準は安定的連続使用と強度の点で異なる。Compton には特別製ものが GE から提供されたわけで、学术界と産業界の人的連携の上で企業の側が科学研究の側の要請に応えたのだった。

VI. まとめ

この小論で明らかにしたことについて整理する。

46) A.H. Compton, The Spectrum of Secondary Rays, *Physical Review*, 19, 1922, 267-268.

47) 蛍光ランプの開発に関与した; G. Wise, *op.cit.* 1), 168.

48) G. Wise, *ibid.*, 206.

49) R.H. Stuewer, *op.cit.* 39), 103.

50) ヤンマー, 『量子力学史 I』, 東京図書, 1974, 194.

51) D.L. Webster (Jefferson Physical Laboratory, Cambridge, Mass.) も 1915 年特性 X 線の放射量の測定用に GE 社の Coolidge からロジウム・ターゲットの熱陰極管を提供されている; D.L. Webster, Experiments on the Emission Quanta of Characteristic X-Rays, *Physical Review*, 7, 1915, 599-613.

第一は、この X 線管の技術の革新の努力は GE 研究所の取り組みによるが、その技術を押上げたのは X 線管技術そのものの改良ではなく、炭素フィラメント特許問題を抱えていた白熱電球技術の革新の努力によるところが大きい。

第二に、この白熱電球の革新の努力は、すなわちフィラメント素材面は Whitney や Coolidge らによって、そして白熱電球内部の構成・状態についての分析はこれを科学実験装置と見立てた Langmuir の基礎研究によって、さらにこの成果を生かして熱陰極 X 線管を考案したのは Coolidge の応用研究（製品開発を含む）による。それらは確かにそれぞれ固有の領域に集約された研究であるけれども相互に連携しあって成果を上げた。

第三に、GE 研究所における開発は、まずは民生用の電球・X 線管開発から始まり、その後の X 線装置技術は軍事的要請、また科学研究用の X 線管の開発は Compton らの科学者からの要請など、各方面からの意味合いの異なる要請によってその技術レベルを仕上げていった。

こうして 1920 年代初め X 線の粒子性を示した Compton の X 線散乱実験に示されるように、X 線管技術は 1910 年代前半のそれに比してその性能は高度なものになった。なお、Compton はこの X 線の粒子性を明らかにした研究で、同様に Langmuir は白熱電球を契機とした表面化学の研究で、後にノーベル賞を受賞したことを付記しておく。

A Study of the Research & Development by Coolidge and Langmuir in the GE Laboratory that Raised Technical Level of X-Ray Tubes

Tomohiro Hyodo *

Abstract

Mutual relations of research results of Coolidge and Langmuir that the author examines in this paper are brought together.

First, the improvement of the technology of this X-ray tube is large owing it to the approach of the GE laboratory. That is, the technology was pushed up by the effort of the reformation of not the improvement of the X-ray tube technology but the light bulb technology.

Secondarily, the filament material of this light bulb technology is reformed by Whitney, and Coolidge and the new observation in the composition in the light bulb depends on the pure research by Langmuir that chooses the lamp as the science experiment device. In addition, it is done to make the best use of this result and to have designed the hot cathode X-ray tube by the product development of Coolidge. It has jointly each other obtained the result though they are the researches certainly consolidated in a peculiar area respectively.

Thirdly, these equipment developments in the GE laboratory start from the lamp of the start household use and the X-ray tube development for the medical treatment, and the development of X-ray device afterwards is improved by a military request, and the development of X-ray tube for the scientific inquiry is advanced by the request of scientists, and has raised the technological level.

And thus the performance of the X-ray tube seen in the scientific experiments of Compton's X-ray scattering in the 1920's was more advanced than that of it in the 1910's.

Keywords:

Research and Development, Company Institute, X-ray Tube, Incandescent Electric Lamp, Experimental Device, Coolidge, Langmuir

* Ritsumeikan University College of Business Administration Professor