

深部照射の物理学的技術的基礎

Die physikalischen und technischen Grundlagen der Tiefenstrahlung

Dessauer F^{*1}. Strahlentherapie. 1:310-24, 1912

A

X線の効果を、人体の表層ではなくある程度深部に及ぼす試みの歴史はまだ浅い。アメリカの Senn [1], ドイツの Albers-Schönberg [2], Heinecke [3] らは、1903年, 1904年にX線の深部、特に脾やX線感受性の高い精巣への作用を観察している。ライプニッツの外科医 Perthes は、人体深部の構造の作用に関する問題に特に注目して研究している。その1904年のArchiv für klinische Chirurgie掲載の論文では、口唇癌を皮膚を通して照射して治癒に成功したことを報告している。当時、最も重要かつ深部照射の事実上の出発点となったものは、1904年末に発表された Perthes の論文「放射線治療における組織透過性の意義を考慮したX線の人体組織透過性測定の試み」である。これは、深部照射の試みの原点といえるものである。ここで Perthes は、人体において生物学的作用がどの程度深部まで及ぶかという問題について広範な実験を行なっている。彼はX線を深部に作用させるべく、様々な方法を行なっている。すなわちX線管球の距離を離し、硬いX線管球を選択し、錫箔を使用してX線をフィルターすることにより、X線の硬い成分が作用するようにしている。しかしこのような正当な方法論にも関わらず、深部照射法の見通し明るくない、という基本的には否定的な結論に達している。結語にはこう書かれている。「人体を照射すると、X線強度は表面から体内にかけて急速に低下する。中等度の硬さの管球では、深度1cmで元の強度の50~60%, 2cmで35~45%, 3cmで20~30%となる。硬い管球を使用すると強度の減少は緩和されるが、それでも4cmで元の強度の40%以下、5cmで25%以下に減少する。深部の強度減弱は、体表に吸収層(1mm厚のアルミニウム)を置くと、著しく緩和される。」

著者は Perthes の研究は知らなかったが、友人であり以前の同僚でもあった Paul C. Franze 医師との議論に触発されて、1904年末に深部照射の問題の物理学的解決法を検討し、これに成功した[5, 5a]。ハイデルベルク大学の Czerny 博士^{*2}の援助を得て、1905年、1906年に長期にわたる深部照射を試み、その物理学的な条件を実際に検討することができた。

1907年初頭、この一連の試みの結果はドイツ物理学会で報告し、その講演録に掲載されている[6]。この仕

事は当時少数の施設、Halleの物理学研究所(Dorn博士)[9]と提携した Franze 病院(Veit博士)[8], Mannheim の Wetter 博士[7], Schüller 博士[10]その他[10a, b, c, d]で採用されたのみであった。しかしまもなく、このような動きが大きくなり、各所で放射線科医が深部照射を開始し、Perthes と著者の方法がほぼ完全に行なわれ、あるいは様々な変法が登場した。現在では深部照射は広く行なわれており、効率的、均一な照射を行なうための初期の著しく困難が時間とともに克服され、これを達成できる装置が経済的に入手可能となれば、今後発展していくであろうことはほぼ間違いないところである。

個々の症例にとどまらず広く応用できる深部照射の方法が、近年登場している。技術の世界では、装置は具体的な需要があつてはじめて必要な完成度に達するものであるが、筋腫の治療における素晴らしい好成績が、深部治療用装置をようやくもたらした。以下では、まず簡単に深部の均一な照射の物理学的、技術的基本を述べ、深部に作用するX線を照射する装置について述べる。最後に、著者が設計し、過去数ヶ月にわたって試用して、深部照射に従前より適していると考えている装置に言及する。

B

Perthes は「X線の生物学的作用はどの程度の深度に及ぶか?」を研究した。著者[5, 6]はこの問題以下のようないくつか異なる方法で検討した。X線の治療効果は、様々な細胞が同じ量のX線に異なる反応を示し、異常な細胞が正常で健常な細胞よりもしばしば強く反応することに基づくものである。このような放射線感受性の差による選択性的作用を明らかとなるためには、病的細胞群と健常細胞群ができる限り同じ条件下で照射され、健常細胞が病的細胞よりも多く照射されるようないようになることが必要条件である。さもないと、感受性の差が相殺されてしまうからである。軟X線が非常に強い生物学的作用を持つことは知られており、軟X線は皮膚表面でほとんど吸収されること、そして生物学的作用は皮膚で最大となり深部では非常に弱いことも認識されている。物理学的理由により、深部の病的細胞群に作用を及ぼすことはできず、従って深部の細胞に表層の健常細胞と同じ効果をもたらすこと、すなわち均一に照射することは不可能である。そこで著者はこの問題を、以下の様に捉えた。X線を同一条件下で、人体の任意の深度に表層と同じように照射することは物理学的に可能か? 表面では、X線は一定の

^{*1} 技術者. Frankfurt am Main(前 Aschaffenburg)

^{*2} 訳注. Vincenz Czerny (1842-1916), ドイツの外科医。特に癌の手術で有名。世界初の腎細胞癌の手術を行なった

それほど広くない範囲に均等に当たる。従って、表面は均一に照射される。個々の点については、X線は均一に当たり、個々の点の線源からの距離は均等である。しかし深部ではこれとは異なる。X線は不均一で、距離も表面よりも遠い。それでも物理学的に表面と同じように、すなわち均一に照射しうるであろうか？

この問題設定には、深部治療の将来がかかっていることは明らかである。深部を表面と同じように照射できれば、二次的変化、吸収などはまず考慮外におくとして、一次的には表面と同じ効果が得られるはずである。しかし問題が物理学的に解決され、すなわち物理学的に深部を表面と全く同じように照射することができ、表面が深部より多く照射されることがないようにできたとしても、技術的にも完全とは言わないまでも近似的に物理学的な解に近い状態にする必要がある。物理学的に可能な条件を実現するための技術的な方法は、異なる性質のものが数多くありうる。物理学的な解決法は、2つの引用論文で扱われている。以下に要約を示す。

1. 透過性が上昇すると、X線の生物学的エネルギーは急速に低下する。深部に達したX線は、生物学的作用をほとんど有しない。通常の状態では、表面で吸収され、そこで大きな生物学的作用を発揮する。
2. X線像からわかるように、人体の各部分のX線吸収の程度は異なる。隣接する細胞群の吸収が大きく異なれば、X線作用の均一性は大きく損なわれる。
3. 深部照射の障害の第3の要因は以下のようなもの

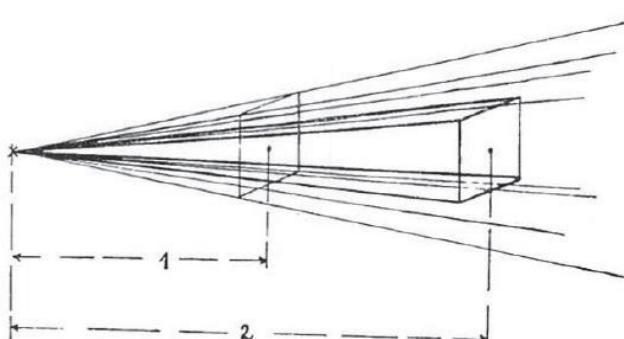


図1. 空間的均一性I

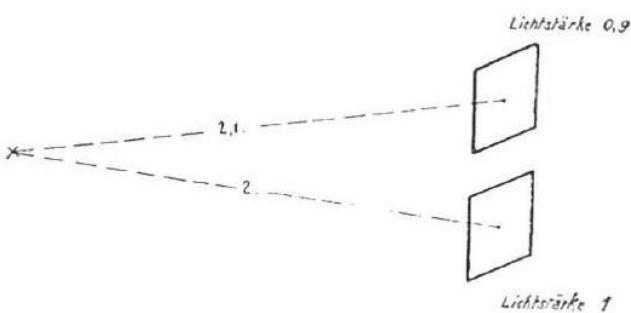


図2. 空間的均一性II. 距離2.1の時の輝度0.9、距離2の時の輝度1.

である：X線強度とその生物学的エネルギーは、距離の2乗に従って減弱する。一般に深部領域は皮膚表面よりX線管球から遠いため、これも放射線の均一性に影響する。

これら3つの障害は、物理学的には以下の様に解決される（詳細については引用文献を参照されたい）。照射距離を大きくすると、体内深部の空間的減弱はもはや問題にならなくなる（図1）。これは以下のように考えれば明らかである。ロウソクから距離1mの位置に置いた紙は、距離2mの紙に比べて4倍明るい。しかし、距離2mの紙を2m1cmに遠ざけても、その差は小さい（図2）。これを深部照射の問題に当てはめれば、体内深度は全体距離に比べれば小さいので、均一性は保たれ、距離の問題は重要ではなくなる。従って、X線管球を被写体から遠く離せば、空間的均一性は改善される。著者がCzerny博士の施設で初めて深部照射を行なった時のような、極端な条件を考える必要はない。深度数cmの照射であれば、空間的均一性を高める他の方法も併用する限りは、それほど大きな距離はとらなくても十分である。

そのような方法の一つとして、図3に示す異なる方向から照射する方法がある。周囲を不透過性物質でカバーした異なる方向の入射門から照射すれば、X線は中央で交差し、深部の減弱分を複数の照射で補うことができる。この方法で、放射線の空間的均一性が可能となる。X線吸収は、透視や撮影に利用される照射とは異なり、一定の非常に硬いX線を使用するほど小さくなる。これは容易に証明できる。硬い管球を使用すると、骨と筋肉の区別、手の透視像のコントラストは非常に小さくなる。極端なまでに硬くすると、非常に濃度が近い異常細胞と正常細胞の吸収の差は無視しうるほどになる。これは、軟X線の場合にはありえないことである。従って、吸収の均一性を得ることができる。

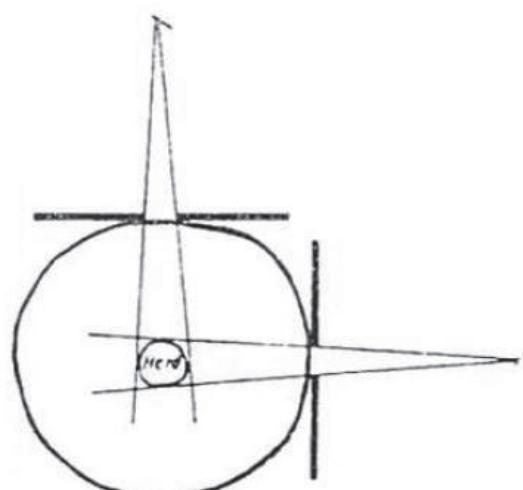


図3. 空間的均一性III

3番目の重要な必須条件は均質性、前掲の論文で述べているように特異的均一性³である。すなわち、表層が深部以上に照射されないようにすることである。一般にはこの逆である。硬X線も、特に軟X線は表面に作用する(図4)。これらは表面で吸収され、深部では硬X線のみ作用し、生物学的作用は非常に弱い。特異的均一性を作ることが大きな課題である。非常に硬い管球を選択し、軟X線を事前にフィルターすることにより、非常に硬いX線のみが表面に当たるようにすることができる(図5)。実験的に、極端な状況を再現した。前後に密接して立つ4人の人間を通して照射すると、蛍光板上で人体は曇ったガラス板のようにわずかに見える陰影となる。特異的吸収差は、このように平均化される。著者はさらに実験的に、正面から照射する場合、人体の上と下でほぼ同程度に吸収されること、すなわち空間的均一性³と特異的均一性³が保たれることを示した。特に強調すべきは、個々の症例において物理学的均一性を求める必要はないという点である。ここでは一般に近似的なもので十分である。臨床では理想的な均一性は過剰である。しかし、深部照射の問題を解決してさらに発展させるためには、まず物理学的に理解して純粹に物理学的条件を試験する必要がある。昨今の文献で、著者が最初の論文に記載した条件を、全ての深部照射症例に要求しているとする誤解が見受けられる。決してそのようなことはなく、またその意図もない。そうではなく、問題の解決法がどこにあるかを示し、また実際の方法の向かうべき方向を示すこと、そして個々の症例については可能な限り、また実際的に可能と思われる範囲でこの方法を実践することが唯一の意図である。実際の深部照射は常に、多かれ少なかれ物理学的解の近似である。

C

物理学的解決から技術的解決の間には、相当な距離がある。初期の深部照射の失敗の原因是、線量が小さ過ぎるか、あるいは線量が十分大きくとも照射時間が長過ぎたことである。深部照射に使用されるような非常に硬いX線は、生物学的作用がほとんどなく、線量計の試薬をほとんど変色させない。従って長時間あるいは大線量の照射が必要である。X線管球は電流に応じて混合X線を放出するが、一般に多くの軟X線と少量の硬X線を含む。硬い管球は比較的大量の硬X線を放出するが、実際には軟X線(と熱)も多く放出する。初期の深部照射では、原則として一般的なX線装置で、できるだけ硬い管球にフィルターを併用し、過負荷、過熱を防ぐために頻回に管球を交換し、複数の方向からフィルターを介して照射した。この方法は現在も、

多くの症例で行なっているが、個々の症例については多くのバリエーションがある。著者の実験では、最適なフィルターは窓ガラスであったが、プラハのJakschは銀箔で非常に良い結果を得ている。

アルミニウムは非常にしばしば使用され、著者の知る限りではKienböckが初めて報告した、1mm厚アルミニウムと1cm厚の筋肉の吸収が等価であるとする記述は概ね正しい。特に最近は、フィルター材質としてアルミニウムを最も多く使用しており、良い結果を得ている。深部照射における距離は、初期は非常に大きくとっていた。しかし長距離では放射線が激しく劣化することから、止むを得ず接近する必要があり、個々の照射における空間的均一性の不備を、照射門を増やすことで補正する。最近では照射格子、すなわち正方形あるいは円形の穴を開けた不透過物質(鉛)の箔を、照射野の表面に置くことが行なわれている。X線は絞りを通して照射されるので、深部で常に同じ位置に達する。深部領域に向けて様々な側面から狙撃する方法は、Gaussが命名したように十字火照射することになる。これらの方法はすべて利用可能で、いずれも目的にアプローチするものであり、物理学的均一性に近づくほど、有用性も大きなものとなる。フィルターの選択、撮影距離、管球硬度、多門照射などを援用し、個々の症例で深部照射に必要な条件に適した方法を求め、まず表面を保護し、次いで深部に十分な線量が届くようになる。

深部照射の技術的な主な問題は、別の所にある。診断目的の通常の装置では、できるだけ混合したX線を放出することが目的である。すなわち、軟X線、硬X線が豊富に混在する放射線で微妙なコントラストの画像を作ることである。一般に、スパーク誘導コイル、新しい交流装置、電撃装置などがこれに適うものである。このような装置を深部照射に使用すると、その透視、撮影における利点、すなわち混合放射線は、明らかな欠点となる。混合放射線のうち、最も硬い放射線のみが利用され、軟らかい部分は皮膚に到達する前に捕捉されてしまうからである。従って、現在診断目的、表層の照射用に作られている装置とは全く異なる深部照射用装置を作らなければならないことは明らかである。著者は既に、1905年の第1回X線学会のX線技術の目標に関する講演を、以下の言葉で締めくくった。「診断応用については、我々が目指す目標の中でも特に、濃度識別のさらなる向上が最重要課題であり、この方向で努力を続けている。治療応用については、ことX線技術に関してはアプローチを変え、新たな目標を見据え、大きく異なる装置の製作に進むであろう」。

深部照射については、現在まさにこうなっている。すなわち、電気エネルギーを可及的に硬いX線に変換し、軟X線の生成、過剰な熱発生を避けるようなX線管球を作ることである。X線管球は、入力された電気か

³ 訳注。特異的均一性(spezifische Homogenität)。ここでは線質に依存する深度方向のX線強度の均一性をこのように称して、平面内のX線強度の均一性(空間的均一性, räumliche Homogenität)と区別している。

ら2つのエネルギー形態を供給する。すなわちX線と熱であり、一般に熱が大部分でX線は非常にわずかである。X線管球の消耗は、その大部分が熱の発生によるもので、通電の仕方による運用方法とは無関係である。例えば、強力な閉鎖式コイル誘導装置は、一般に大量の熱を発生し、急速に管球を破損することは良く知られている。しかし放電が適当であれば、発生する熱は避けられないほどではなく、管球の電流に応じて変化することは明らかである。一般に、電流が適切である場合は、より多く、より長時間通電するほど管球の寿命は短い。電流は軟X線、硬X線をともに生成する。軟X線、硬X線いずれの場合も、電流が消費される。しかし、深部照射の目的には軟X線は使用できず、硬X線のみが必要である。従って、軟X線を生成しないのであれば、小電流で駆動することができる。しかし、小電流で管球を駆動すれば、この理由だけででも

管球の劣化は明らかに少ない。この技術的問題に直結する関連性を、例を挙げて明示する。X線を10cmの距離から、3mm厚のアルミニウム箔に照射し、このアルミニウム箔の上および下にX線量を測定する試薬を置き、X線管に5mAを通電して通常の運用条件とする。上に置いた（アルミニウム箔で覆われていない）試薬には25X（Kienböck単位）、50mA・分が照射される。アルミニウム箔の下に置いた試薬は、2 1/2 Xとなる。この差分はアルミニウムに吸収されたものである。これは次のように考えられる。表面では、1Xを発生するための電流は2mA・分のみである。しかし、3mm厚のアルミニウムの下では、2 1/2 Xを発生するために50mA・分、1X当たり20mA・分の電流が必要であり、すなわち深部では1X発生するために20mA・分相当の管球劣化がある。これは、3mm厚アルミニウムの下では表面の10倍の管球劣化、負荷があると解釈できる。

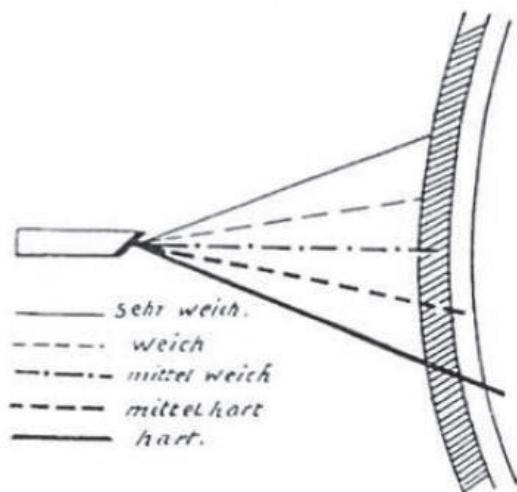


図4. 特異的均一性I. 上から非常に軟らかい、軟らかい、中等度、中等度に硬い、硬いX線。

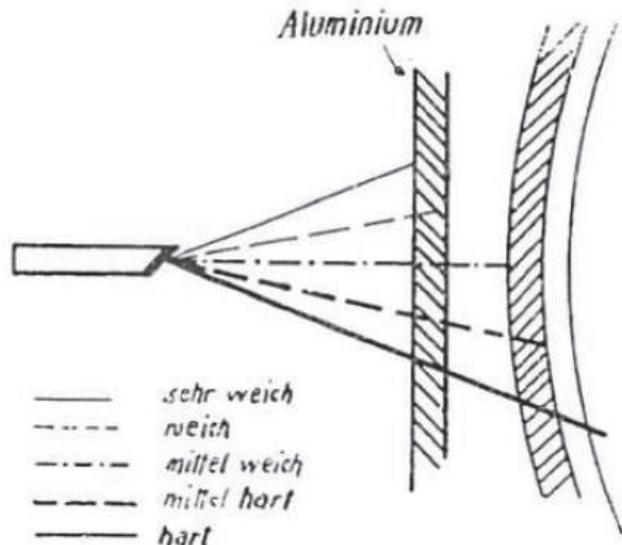


図5. 特異的均一性II. 被写体の前にアルミニウム層を置いた場合。

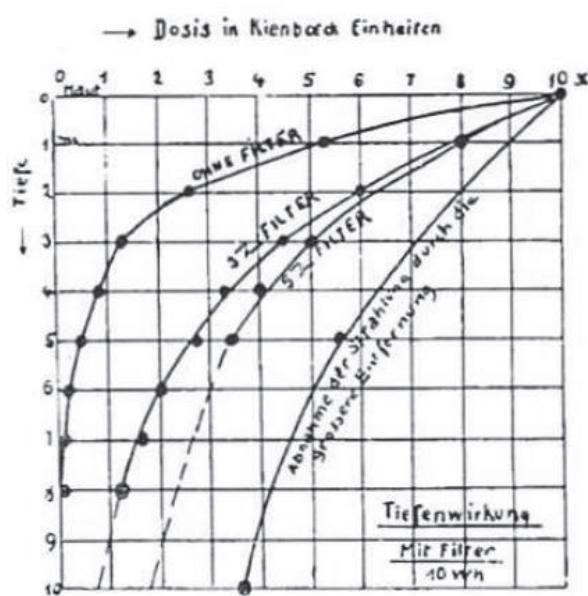


図6. 照射時間10分、5mA、X線管球硬度20Wh、焦点皮膚間距離15cm、8mm厚アルミニウムフィルターで、深度8cmで1.3X、皮膚面で10Xが得られる。横軸：線量（Kienböck単位）、縦軸：深度。上からフィルターなし、3mmフィルター、5mmフィルター、管球距離を大きく場合

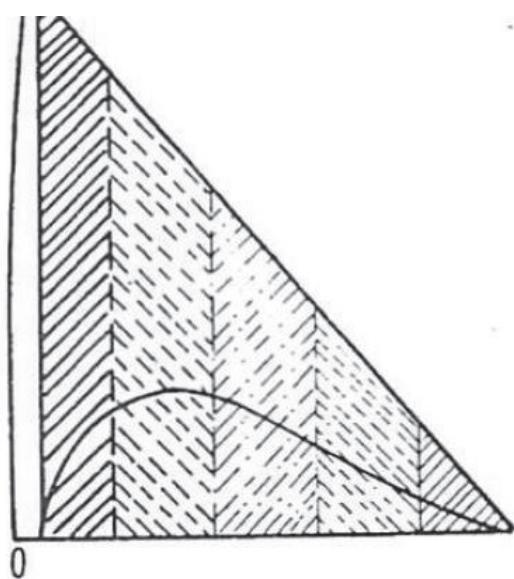


図7. 管球の電圧、電流、硬度の変化

管球を消費する電流の大部分は、利用できない軟X線であることから、10倍の個数の管球が必要であると言える。3mm厚アルミニウムの下で1X当たり5mA・分で管球を駆動できたとすれば、2 1/2Xを得るために12.5mA・分の負荷ですませることができる。さらに、フィルター下で1X当たり2mA・分にすることができるれば、5mA・分で2 1/2Xを得ることができ、負荷を5mAではなく0.5mAにすることができる。これは大きな進歩である。著者は最近、フランクフルトのVeifa社の装置で、体内深度3cmに相当する3mm厚アルミニウム下、1X当たりわずか1.22mA・分の照射に成功した。これは同じ深度で従来の1/10ないし1/20の電流、管球負荷で済むことを意味している。このような装置は、診断目的にはほとんどあるいは全く有用性がなく、表層の照射にも使えないことは明らかである。

深部照射用装置は、市場需要があつて初めて普及するが、筋腫に非常に効果があることが知られて普及した。筋腫への照射が、特にフライブルク病院での業績を通じて広く受容され、深部に大線量を照射する必要性が生じ、放射線技師も管球に劣化を与えることを行なう必要に迫られた。著者は、構造上最も重要な方法は次の3つと考える。

1. ベルンのSchwenter-Trachsler教授が記載した長期間隔による管球負荷法
2. Janus(Reiniger, Gebbert & Schall)による休止スイッチ法、そして
3. 以下に示す著者の過電圧駆動法

この方法を簡単に述べる。詳細については個々の論文を参照されたい。

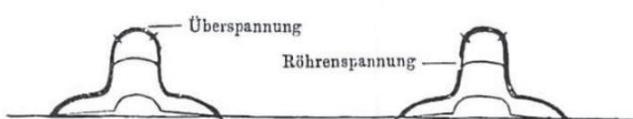


図8. 理論的電流曲線。

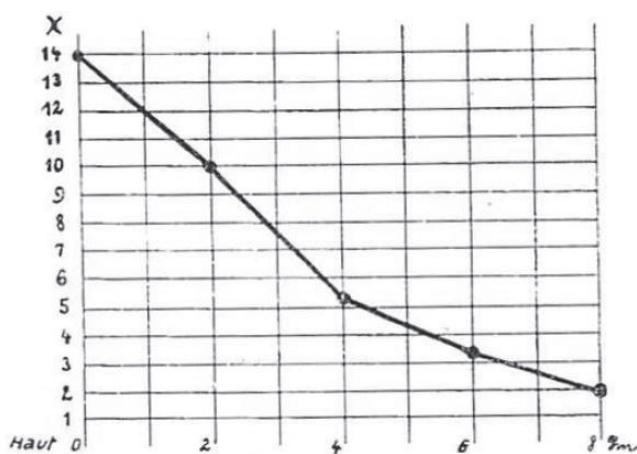


図9. 管球硬度10 Benoit単位、負荷2mA、照射時間10分、焦点皮膚間距離15cm、フィルター3mm厚アルミニウム。横軸:組織内深度、縦軸:X線量(Kienböck単位)。

これは、Schwenterの方法 [Münchener Medizinische Wochenschrift, 50, 1910] が報告したもので、X線管に電流サージが流れると電離状態がしばらく続き、その直後に新たに電流を流すと、サージ後にゆっくり回復させた場合よりも多くの熱を発生するという現象に基づくものである。ここでは、X線管の放電は休止期間をはさんで断続され、特にVeifa社の電撃装置のような強力な誘導コイルを使用して、フライブルク病院では初の好成績を収めた。3mm厚アルミニウムの下で1Xを照射するために、従来の装置では10, 20, 時には25mA・分必要であったところが、この装置では約3.8mA・分前後で可能である。以前に、Reiniger社のJanus, Gebbert & Schallが、通常の水銀断続器の他に、「Rythmeur」と称する断続スイッチを製作している。これは、電流が1/2秒オン、1/2秒オフを繰り返すものであった。これによって装置が断続され、X線管はオン、オフ、オン、オフを繰り返す。オフになる度に、熱を放散する時間があり、オンの時間により多くの電流を供給することができる。この方法で、フライブルク病院では1Xあたり2mA・分を達成し、著者も自ら追試で確認した。Janus[11]の報告では、下記のグラフのように3mm厚アルミニウムで1Xあたり5mA・分が必要である(図6)。著者がVeifa社で最近開発して報告した新しい方法は、以下の考えに基づくものである。

スパーク誘導コイルの誘導サージでは、切断時に2次回路の電圧が電気回路(X線管)をブレークスルーするほど昇圧する(図7)。最初のブレークスルーで、X線管のガスが電離し導電性となり、電圧が下がっても管球内の電流は増加する。このため、X線管のブレークスルーの最初期に硬X線が発生し、電圧が低下するにつれて軟X線が発生する。交流装置ではこの関係は異なる。この場合は、一次側の変化は断続器のように不連続ではなく一定の速度で変化し、この結果二次回路の電圧はゼロから最大値まで比較的緩徐に上昇する。交流装置のブレークスルーは、電圧が高くなった状態で発生する。交流装置の緩徐な誘導波形では、ブレークスルーの後、管球内の電流が比較的長時間持続し、電圧が緩徐に低下して非常に低い電圧が管球に電流が流れ、軟X線が優位に発生する。従って以下の点に配慮すれば、前述の問題の解決法として、交流装置でも非常に硬いX線を発生することができる。

まず、常に抵抗X線管に並列に接続する。この抵抗の目的は、変圧器内に発生しやすい高周波振動を除去してX線管を保護すること、特にX線管の破裂放電を防ぐことである。このような抵抗器を並列接続すると、1次コイルから2次コイルへの伝達率が管球に負荷を与えることなく大きく上昇し、2次電圧を十分昇圧することができる。新装置の第2の特徴は、2次電流が一定以上に昇圧した時のみ、X線が2次回路に接続さ

れることである。その前には、回路の抵抗は非常に高い。ここで得られる利点は、X線管が交流2次回路内でオンなり、ブレークスルー抵抗によってその電圧が決定する場合にくらべて、X線管球に供給される電圧がかなり高くなることである。

第3の特徴は、電圧が低下してX線が軟らかくなると、高電圧スイッチが電流を再び遮断することである（図8）。このような方法で、図9に示すように交流装置で、非常に低電流消費(mA・分)で非常に硬いX線を生成することができる。このグラフは、文献[Münch Med Wochenschrift 11, 3月12日, 1912. 訳注：引用文献11をさすものと思われる]のグラフよりもはるかに良好である。また、必要なエネルギー(mA・分)もかなり小さい。深部照射の基礎技術は、このように大きく進歩している。深部照射の経済性も改善され、以前に法外であった管球消耗も大幅に減少した。この治療法はなおしばらくは高価であろうが、少なくとも広く実践できるようになった。約8年に及ぶ技術的努力の末に達成されたこの技術的基盤が、深部照射法のさらなる成功に至ることを願うものである。

- 1a) Senn, N., The therapeutical value of the Roentgen rays in the treatment of pseudoleukaemia. New York Med. Journ., 18. IV. 1903. Ref. Zentralbl. f. Chir. 1903, Nr. 33, S. 905.
- 1b) Senn, N., Case of splenomedullary leukaemia successfully treated by the use of the Roentgen rays. New York Med. Record, 22. VIII. 1903. Ref. Zentralbl. f. Chir. 1904, Nr. 15, S. 476.
- 1c) Senn, N., The X-rays in lymphadenoma. New York Med. Journ., 18. IV. 1903. Ref. The Lancet 1903, Vol. I, p. 130.
- 2) Albers-Schönberg, Über eine bisher unbekannte Wirkung der Röntgenstrahlen auf den Organismus der Tiere. Münch. med. Wochenschr. 1903, Nr. 43, S. 1859.
- 3) Heinecke, Über die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf innere Organe. Münch. med. Wochenschr. 1904, Nr. 18, S. 785 und Nr. 21, S. 927.
- 4) Perthes, Versuche einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 1904, Bd. 8, H. 1.
- 5) Dessauer, Beiträge zur Bestrahlung tiefliegender Prozesse. Med. Klinik 1905, Nr. 21, S. 526. Ref. Fortschr. auf d. Geb. d. Röntgenstrahlen Bd. 9, H. 1, S. 80.
- 5a) Dessauer, Probleme und Methode der Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. Therapeutische Rundschau 1908, Nr. 44.
- 6) Dessauer, Eine neue Anwendung der Röntgenstrahlen. Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 1907, Bd. 9, Nr. 3.
- 7) Veit, Zusatz zur Arbeit Prof. Dr. Dorns über: Zur Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. Münch. med. Wochenschr. 1909, Nr. 14.
- 8) Dorn, Zur Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. Münch. med. Wochenschr. 1909, Nr. 14.
- 9) Wetterer, Die Homogenbestrahlung nach Dessauer. Arch. d'électr. med. Nr. 247. Ref. Fortschr. auf d. Geb. der Röntgenstrahlen Bd. 13, H. 3, S. 189.
- 10) Schüler, Erfahrungen mit der Dessauerschen Röntgentiefenbestrahlung. Deutsch. med. Wochenschr. 1909, Nr. 31.
- 10a) Schwenter, Eine neue Methode der Röntgenbestrahlung. Münch. med. Wochenschr. 1910, Nr. 50.
- 10b) Krüger u. Dessauer, Die Nachbehandlung operierter Karzinome mit homogener Bestrahlung. Berlin. klin. Wochenschr. 1908, Nr. 11.
- 10c) Franz, Homogenbestrahlung. Deutsche Ärzte-Zeitung, August 1908.
- 10d) Sommer, Über das Problem der homogenen Tiefenbestrahlung in der Röntgentherapie. Zeitschr. f. neue physikal. Med. 1908, Nr. 11.
- 11) Janus, Ueber die Technik der Röntgenbestrahlung tiefliegender Gewebe. Münch. med. Wochenschrift 1912, Nr. 11.