

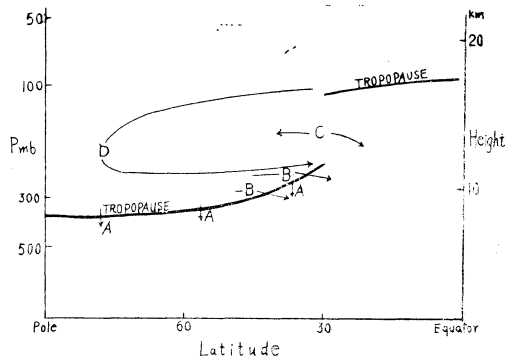
フォールアウトの気象学的側面*

三 宅 泰 雄**

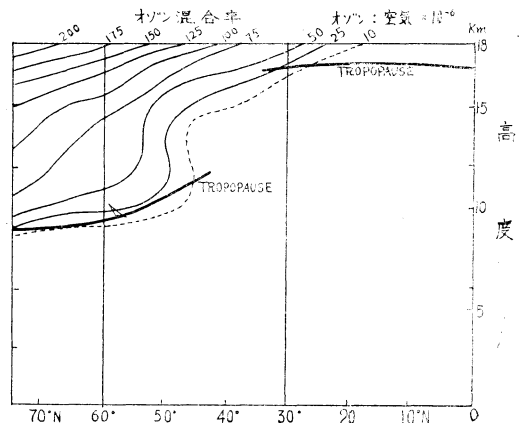
1. 成層圏に打上げられたチリはどのようにして対流圏に流れこむか？

成層圏に打ち上げられた放射性的チリが、どのような経路で、いつ対流圏内に落下してくるか、ということはまだよくわかってはいない。しかし、いくつかの可能性は考えられている。その一つとして、冬期になると高緯度から極にかけて圏界面附近での水平および鉛直混合が大きくなり、下部成層圏の放射性的チリを含む空気の一部は圏界面を通じて対流圏に流れこむだろうことが考えられる。第2に極の近くの成層圏内では、日射の再来の時期に気温の急上昇がおこり、ときには数日間に30~40°Cの上昇をきたすようなことがある。このような初春の爆発的温暖化は成層圏大気の大規模な沈降をとめない成層圏の空気の一部は対流圏に流れこむであろうという。第3の考え方としては、圏界面の隙間の近くには亜熱帯ジェット流があるために、水平、鉛直ともに空気の混合がよく行われ、成層圏大気の一部はこの隙間を通して対流圏に流れ出るといふ。第4の可能性は、とくに Brewer が大気オゾンとの関連においてのべているものである。亜熱帯ジェット流の北では圏界面をよこぎっていわゆる等エントロピー面を生じ、空気はこの面にそって、成層、対流両圏内に自由に行き来することができるという。また彼は圏界面の隙間の中にも等エントロピー面のできることがあり、このようなときには成層圏の空気は相当大規模に対流圏の空気と入れ代り得るだろうという(第1図)。事実、しばしば、圏界面の隙間からオゾンの少ない対流圏の空気が成層圏奥深く入りこんでいることが観察されている(第2図)。これら等エントロピー面での空気の交流は晩春から初夏にかけておこりやすいといわれる。

赤道附近は対流圏大気の上昇域にあたっている。対流



第1図 成層圏から対流圏にオゾンの流入する可能なメカニズム (BREWER)



第2図 成層圏内オゾンの分布 1958年7月 (BREWER)

圏大気が圏界面を通じて成層圏まで達しているかどうかについてはまだ疑問の余地もあろうが、とにかく赤道および低緯度の成層圏から放射性的チリが降ってくる可能性はきわめて少ない。対流圏大気の赤道附近の上昇は成層圏にまで及んでいるだろうという見解はオゾン観測者によって提出されている。赤道附近の圏界面の上では数

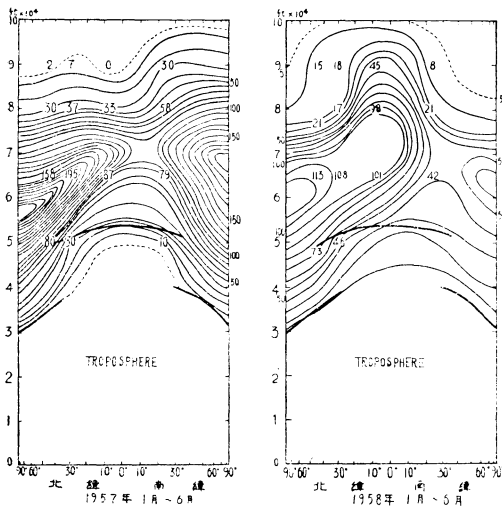
* Meteorological Aspects on Fallout

** Yasuo Miyake, (気象研, 東京教育大)

—1961年12月20日受理—

キロにわたってオゾンが大へん少ないという観測結果がこの考えを支持する。

成層圏における東西方向の流れについては、いくつかの観測結果はあるが子午線方向の流れについてはまだたしかな観測結果はない。しかし、Dobson, Brewer, Goldie, 三宅たちは、赤道から極に向う流れがあると考えている。その早さとしては1~3ノットの推定値を与えられている。Goldie たちは、さらにこの極方向の流れの上に赤道に向う反流があると考え、その速さは下部成層圏の極方向の流れに比べて $1/10$ くらいだろうという。このような考えが正しければ、放射性のチリは高緯度地帯に蓄積する傾向をもつであろう。タングステン185を水爆の放射性チリとともに低緯度地帯の成層圏に打ちこんで、その分布を観測した結果がある。これによると1958年の春に成層圏に打ちこんだのに、1959年の中ごろになっても、まだ、赤道附近の上空に W-185 の極大がのこっていて、Dobson たちのモデルに疑惑を投げかけている。しかし、一方 C-14, Sr-90, オゾン等の成層圏内の分布を見ると、明らかに高緯度成層圏内における蓄積が見られ Dobson モデルを支持するが、それを証明するにはまだ不十分である(第3図)。



第3図 成層圏におけるストロンチウム 90 の分布

以上のべたような成層圏からの放射性チリの落下機構の内どれが正しいか、またどれが卓越しているか、またいずれも大なり、小なり実際におこっているか、という判定はむづかしい。しかし、いずれにせよ、放射性チリの落下が中緯度乃至高緯度で行われていることはたしかなことといえよう。この考えを支持する観測事実がある。

1958年の秋ソ連は大量の放射性チリを成層圏に打ちこんだ。1959年春に地上に落下した成層圏チリの年令(フィッシュン後の見かけの年令で、長寿命の Sr-90 に対する短寿命核種 Sr-89, Ce-144 等の比からもとめられる)と成層圏内のチリの年令を比較した結果、後者の方が前者より古いことがわかった。ただし、成層圏内の放射性チリの年令の測定は低緯度から 50°N までしか行わなかったもので、もし、年令の若い放射性チリの成層圏から対流圏への流入があったとすれば、それは 50°N 以北であったろうということになる。しかし、つねに 50°N 以北のみで放射性チリの流入が行われるかどうかは疑問であり、流入の場所としてはこのほか中緯度に位するギャップおよびその附近、とくにその北側(北半球では)あたりが問題になるであろう。

2. 放射性チリはどれくらい長く成層圏にとどまるか
水爆実験の場合には、それが地上バクハツでなければ、大部分の放射性チリは成層圏に打上げられ、いわゆるキノコ雲の頂上は、ときに 30~40 km に達する。ジェット機を用いて成層圏におけるストロンチウム90の分布をしらべた結果は、北半球の高緯度地域の上空に Sr-90 の極大があらわれ、その高さは 17~18 km くらいであった(1957年前半)。Sr-90 の分布の最高はほぼ 30km でそれ以上の高さでは測定にかかるほどの Sr-90 は存在しなかった(第3図)。

このように分布した成層圏内の放射性チリは、どのくらい長く成層圏に留まるだろうか。フォールアウト研究の初期において、Libby は成層圏内における Sr-90 等の平均滞留時間を20年とした。この数字はあまりも大き過ぎ Libby 自身ものちにそれを10年と改めたが、当時三宅らはこれに対し5年という数字を与え、国連科学委員会は7年を採用した。

1958年10月に核兵器実験が停止され、その後の経過から、日本の観測では放射性チリの成層圏内平均滞留時間は1.3~2.6年となり、他国の値も大体1~3年の範囲に収まった。成層圏内における放射性チリの滞留時間は、しかしながら、放射性物質が放出された場所、高さ、時期によっても異なるだろうといわれている。もし極の近く、あるいは高緯度地方で放射性チリを放出した場合は、放射性チリはそこにとどまり、まもなく、春先における成層圏内の「爆発的温暖化」とともに、その大部分は対流圏に流れこむであろう。したがって、ソ連がしばしば秋に行なう高緯度での実験の産物は、約半年乃至1年の平均滞留時間で、成層圏から除去される。一方、赤道

地域での実験の産物は、成層圏内の大循環あるいは水平混合により徐々に極方向に流れ、中緯度ないし高緯度に達したのち圏界面を通じて対流圏に流れこむであろう。

したがってこの場合は平均滞留時間は長く、おそらく3～5年となるであろう。これらを平均すれば、成層圏全体としての放射性チリの平均滞留時間として約1～3年が得られる。

しかし、これらは地上30km以下の成層圏に対する話である。もし成層圏よりさらに上のメソ圏に放射性チリが打上げられた場合のチリの落下速度は、おそらく、ずっとおそくなるであろう。

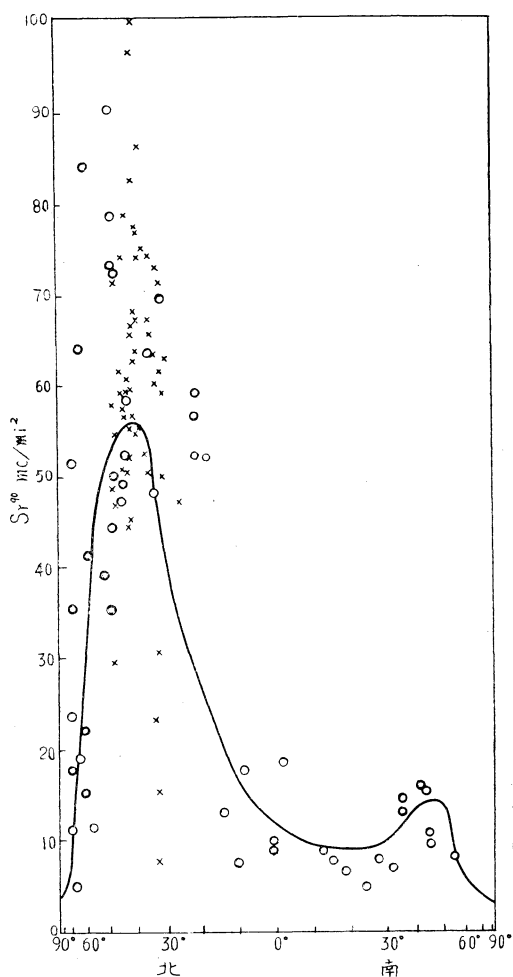
また、100 km 以上に放射性チリが打上げられたときには、地上にもどってくるのに少なくとも10年以上はかかるだろうといわれる。しかし、これも単なる推測以上のものではない。チリが成層圏に打ちこまれた高さによるチリの滞留時間に差があるとすれば、特に中緯度で問題になるであろう。もし成層圏下部では極に向う1～2 kt くらいの流れがあり、上部ではその反対方向の0.1 kt くらいの流れがあると仮定すれば、中緯度地方に上下環流の中心ができるために、わずかの高さの差で放射性チリがその後にとどる運命はかなり異なるであろう。ただし、高さの差によって平均滞留時間に差を生ずるかどうかについては、まだたしかなデータはない。

3. 成層圏フォールアウトは、なぜ北半球中緯度帯に集中落下するのか？

第4図は1959年の終りまでのSr-90の世界における落下蓄積量を示したものである。これで見ると、ほとんど大部分のSr-90の落下は30°Nから60°Nの間で行われている。放射性フォールアウトの北半球への偏在は、一応その発生源が北半球にあることから説明できるが、図のような中緯度帯への集中の説明はかんたんではない。これについていくつかの可能性が考えられる。

その一つは大気オゾンの子午線分布との類似性に着目したもので、成層圏における大気循環の Dobson モデルをその説明の基礎としている。すなわち、高緯度帯における成層圏大気の下降が、その原因であるという。しかし、オゾンの子午線分布では、大体65°Nあたりに極大ができていて、フォールアウトの分布より、かなり北にずれていることが注目される。また、フォールアウトの落下は雨雪がこれを媒介するという点で、気体物質であるオゾンと同じようにはとりあつかえない。

第2の説明は、亜熱帯ジェット流の近くにある圏界面の隙間から成層圏チリが対流圏に流入するために、その



第4図 地球上におけるストロンチウム90の蓄積量

下方の地上にSr-90などの蓄積がおこるといふ考えである。これはSr-90の子午線分布を説明するには都合がよいが、前にものべたように、1958年秋のソ連製の放射性チリは50°N以北で成層圏から対流圏に大量に流入した形跡があり、圏界面の隙間だけからの流入を考えたのでは、観測事実を説明しにくい難点がある。

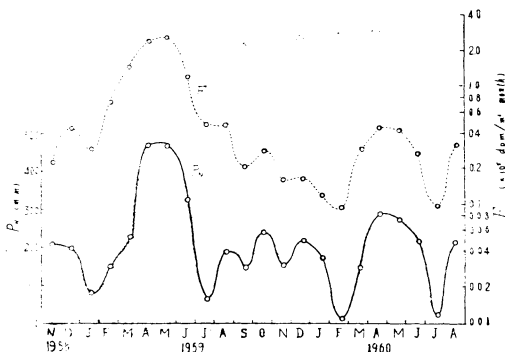
第3の説明は、成層圏から対流圏へのチリの流入箇所の問題をあとまわしとし、対流圏上部の気象条件に着目したもので、三宅およびそのグループによる考え方である。かれらは、500 mb にトラフを伴う降水のある場合に降水中の比放射能が激増する(約3倍)ことをみとめた。また、ジェット流のコアが東京の上か、多少南に下ったときに、この傾向がさらに助長されることを観察

した。これは多分、500 mb のトラフの後面とジェット流の北側において空気の上下混合が大きくなり圏界面下の放射性物質が対流圏下層に流れこみ、そこで雨に捕捉されるものと思われる。0°, 140°E, 80°W の子午線上で500 mb にトラフの発生する頻度をしらべた結果は35°N から45°N の間に、Sr-90 の蓄積量と全く同じ型のピークのあることがわかった。また一方、ジェット流のコアの位置も、年間を通じ30°N から50°N の間に位し、それがSr-90等の落下蓄積のピークと関係のあることを示している。

上にのべたいくつかの説明のうち、第1と第2とは、対流圏内における放射性チリの運命を考えていない点に難点があり、第3は成層圏からの放射性チリの落下箇所におかれていないところに問題がある。

前にものべたように、降水量と放射性チリの落下量には大きい相関があるが、降水量が多くても低緯度、熱帯地方では落下蓄積量の少ないことは、第4図に示すとおりである。降水量とチリの落下量の関係は地域によって異なることがわかり、雨による捕捉以前に、放射性チリの分布が地域により大きく異なることが示めされている。

4. 放射性チリの落下率が春に極大を示すのはなぜか
 ここ6~7年間のアメリカやイギリスでの測定によると、毎年4月から5月ごろSr-90等の落下率（毎月の落下量）が最大となり、夏から秋にかけてそれが小さくなり一見、大気オゾンに似た特異な年変化をもつことがわかった。日本の観測では1957年をのぞき必ずしもこのような季節変化は明瞭でなかったが、対流圏フォールアウトの影響のなくなった1959年以降は毎年、4月乃至6月にSr-90落下率が最大を示した（第5図）。



第5図

F はフォールアウト、PN はノーマライズされた降水量の月ごとの値（東京）

このような、いわゆる“スプリング・ピーク”をどのように説明するかは、かなりむづかしい気象学的課題である。その一つは、大気オゾンの季節変化との類似性から説明しようとするもので、イギリスの Stewart や米の Machta がこれを支持している。この考えによれば冬期から初春にかけての高緯度でのじょう乱の増大とそれに伴う成層圏大気と対流圏大気との交流が、スプリング・ピークの原因であるという。しかし、Sr-90等のスプリング・ピークはオゾンの春の極大（3月ごろ）より、さらにおくれ、ときによっては6月ごろにピークがあらわれることがある。私は、1960年1月のニューヨーク国連科学委員会で、オゾンの年変化は、オゾンの光学的生成と成層圏内の気象の年変化の複合であって、発生原因と発生場所の異なるフォールアウトと簡単にむすびつけるわけにはいかないと論じた。とくにフォールアウト落下率の最大がときには5~6月にあらわれ、オゾンのそれと数ヶ月間位相のずれのあることを指摘した。そのとき、「みなさんは6月も春といわれるのでしょうか」といったらみんなが笑った。

第2の説明はアメリカの Martell らのもので、前年の秋におけるソ連実験の放射性チリは落下速度が速くその翌年の春のピークとなってあらわれるという。この説は Libby によっても支持され、その気象学的うらづけは Palmer によって行われた。Palmer らは成層圏内の春期の「爆発的温暖化」がスプリング・ピークの原因であって、前年の秋のソ連実験の放射性チリに由来する大量落下が翌年の春にもたらされるという。

1958年の核実験停止以来日本でも、その他の国でも、1959年、1960年、1961年と引きつづきいわゆるスプリング・ピークが観測された。少なくとも1960年以降のものは前年秋のソ連実験が直接の原因ではないことが判明した。

第3の考えは三宅グループによるものである。彼らは500 mb あるいはそれ以上の上層でトラフが観測点の上を通り、同時にジェット流が真上かやや南に下ったときに、放射性チリの落下が増強されることに着目した。このような気象条件は、しばしば3月から6月の間に出現し、このような条件にともなう雨は、そうでない雨にくらべて降水量は同じでも、3倍くらいよけいに放射性チリを洗い落す。したがって放射能に関して雨量をノーマライズすると雨量と放射能物質の落下量との間の相関係数は+0.9以上になる（第5図）。このほかに、Brewer らのいう圏界面附近および圏界面の隙間の等エントロピ

一面にそう成層—対流圏の空気の交代が、晩春から初夏に卓越するとすれば、三宅グループのモデルと重なって晩春にピークをもたらすことになるかも知れない。

日本で、しばしばスプリング・ピークが観測されず、むしろ、春ではなく秋にピークが出現したのは一つにはソ連実験の放射性チリの対流圏降下によって、季節変化のパターンがみだされたためと、じっさいに、それらの年の春に上にのべた気象条件が出現しなかったためであった。

5. 放射性チリはどのようにして地上に落下するか

放射性のチリ、あるいはチリに附着した放射性物質は、そのほとんど大部分が雨や雪で地上にはこぼれる。いわゆるドライ・フォールアウトは全体のフォールアウトの20%以下である。日本のように降水量の多いところでは90%以上の放射性チリが雨雪によって洗いおとされる。もちろん雨ばかりではなく、放射性チリは雲や霧の粒子によっても、その粒子ができるときにその中に捕捉される。成層圏からの放射性のチリの大きさはせいぜい1~2μくらいなので、直接の衝突で、雨滴によつて捕捉される確率はかなり小さいはずである。

この難点を救うために Greenfield はチリのブラウン運動による雲粒への捕捉と、それにつづく雨滴による洗滌の新しいメカニズムを提出した。

降水量と放射性チリの落下量との間の相関は大きく、東京の場合には相関係数 +0.7~+0.9 が与えられている。

放射性チリが対流圏内に放出された場合、放射性チリは、圏内の風系にしたがって行動し、たまたま降水域に入ると、そこで大部分が雨とともに地上におちてくる。チリの移動のはやきは1日につき1500~2000km くらいが多く、その移動経路は500mbの空気のトラジェクトリーに比較的良好一致する。このようにして、放射性チリは地球上を大きく西から東に移動するとともに、南北方向にも拡散しながら、次第に地上におちるが、対流圏内における滞留時間は40日から60日くらいと考えられている。比較的小さい区域内でさえチリの落下には、局地的にムラがあり、大気構造の不均一性を反映している。

原子バクダンの実験による放射性チリの大部分は対流圏内にとびちるので、空気の流れのトレーサーとして用いることができる。1954年4月北海道旭川市の近くで、降った雨の中には異常に多量のチリが含まれていた。そのチリの本体はのちに分ったことであるが北支附近の黄

土の粒子であったが、その土壌の粒子に放射性物質が附着していた。その放射性物質の分析結果から、それは同年3月29日にネバダで行われた原爆実験の産物と推定された。ネバタ産の放射性チリはアメリカ大陸をわたり、大西洋をこえヨーロッパ、シベリヤ、北支を通過して約2週間後には日本に到達したものと思われる。ヨーロッパでは4月5~6日ごろ空気の汚染がみとめられた。ネバダからの500mbのトラジェクトリーはこの推定をうらぎっている。ネバタから日本までの放射性チリの平均移動速度は1日につき平均1730kmであった。

放射性チリの発生源の近くでは広島、長崎の原爆による放射性落下物、福竜丸事件の死の灰におけるような、いわゆる放射性チリの局地落下をこうむる。1957年10月10日午後4時30分にイギリスのウインズスケールでおきた原子炉事故の場合を例にとろう。汚染された空気は約500mの高度を流れ、南イングランドを通過してイギリス海峡をこえ、10月12日にオランダの南部、ベルギー、フランスにまで到達した。一方1500m(850mb)の高度の汚染空気は北海をわたり、オランダ、ドイツの西北部をよこぎりデンマーク、スウェーデンの南部にまで到達している。このとき、ウインズスケール附近200平方マイルにわたり、牛乳が汚染され飲用が禁ぜられたことは有名である。10月11日にあけるI-131による牛乳の汚染は最許容量の倍に達した。

アメリカはいわゆる「大陸テスト」と称してネバダで原爆実験を行っているがネバダで生じた放射性チリの近接落下のために、アメリカの西部は、東部に比べて約20~30%放射能汚染度が高いことがわかっている。

最近アメリカでいわゆる放射能シェルターをつくることを国民に奨励しているが、これは核戦争時における放射性物質の局地および近接落下に対する防禦である。一方、現在われわれが問題にしている放射性フォールアウトは、その大部分が遠隔地に発生源をもつ放射性チリの落下である。われわれはこれを二つにわけて考えている。その一つは対流圏フォールアウトであり、他は成層圏フォールアウトである。対流圏フォールアウトについては、すでにのべたが、その特質としてはフィッシュン後間のない新しい放射性物質を含むことである。これに対し成層圏フォールアウトは主として水爆によって成層圏に打ちこまれた放射性物質からなり、生成後かなり日のたったものが徐々にふって来るのがその特徴であり、一名 delayed fallout (おくれたフォールアウト)といわれる所以である。水爆の場合における対流圏フォー

ルアウトと成層圏フォールアウトの割合は、爆発の仕方、場所によってちがう。高空爆発の場合はほとんど大部分が成層圏に打上げられ、1~2%が対流圏にとどまる。地上爆発の場合は多量の土壌粒子をはねとばすので、ほとんど大部分が局地および近接落下となり、約20%が成層圏に、1%くらいが対流圏にとどまる。

水上爆発では局地及び近接落下は20%で、80%くらいが成層圏に、やはり1%くらいが対流圏にとどまると考えられる。これで見ると、対流圏フォールアウト（局地および近接落下を除いたもの）の全フォールアウトに対する寄与はきわめて少ない。しかし、対流圏フォールアウトもかなり広範囲に大気を汚染し、一時的につよい外部照射を与える危険や、かなり多くの短寿命放射性物質が一時的に体内にとり入れられる危険性がある。

問題をより深刻な成層圏フォールアウトに移そう。成層圏内の放射性チリが対流圏に落ちる機構については前にのべた。成層圏から対流圏に落ちた放射性チリは、対流圏フォールアウトと同じ運命をたどるはずであるが、必ずしも同一とはいえない。なぜなら、成層圏からのチリは匯界面を通じてのみ供給されるからである。また、前にのべたように、赤道および低緯度上空からの供給は考えられず、そのほとんど大部分が中緯度乃至高緯度の上空から供給されると考えられている点において、本来の対流圏フォールアウトとかなりちがうわけである。

成層圏フォールアウト（主として Sr-90 および Cs-137 などの長寿命核種に着目して）の地上への落下、蓄積には注目すべき二つの特徴が見られる。その一つは北半球中緯度帯（30°N~60°N）への集中的な落下であり、他の一つは落下量の季節変化である。この二つの問題についてはすでにくわしくのべた。

6. 放射能チリは地上に落下してからどうなるか

地上に落下した放射性チリは、雨に流されて河川水に入りまもなくいずれは海洋に流されてしまうだろうと考えるのは早計である。もちろん、非常に長い時間を考えれば、新しい放射性チリの供給がないかぎり、一方では放射性物質の壊変で放射能は減衰し、一方では雨水等によるリーチング（流し出し）で地表面から洗い流されてしまうだろう。しかし、現実の問題としては、5年や

10年の短い期間ではリーチングは重要視されない。放射性チリが地上に落下すると、チリは土壌粒子のイオン交換能のために、そこで固くおさえられてしまう。土壌は通常、つよい陽イオン交換能をもっているので、放射性物質は土壌の表面にしっかりと結びつけられる。その放射能は土壌を稀酸で洗ったくらいではとれるものではない。こうして、放射性物質の大部分は地表面から10cmくらいのところにとどまる。土壌の陰イオン交換能は陽イオン交換能ほど大きくはないので、陰イオンを形成する放射性物質の一部（たとえば放射性のヨウ素や、ルテニウムや、テルルなど）は、地表からかなりの深部（1メートルくらい）まで浸透することもある。しかし、フィッシュン生成物の大部分は地表面の近くに根をすえる。これがどのような割合で雨水その他によってリーチングをうけるのだろうか。まだ、たしかなデータはない。

しかし、河川水中の Sr-90, Cs-137 などの濃度と、その集水面積と、その中での降水量、土壌中のこれらの放射性物質の濃度などの測定から、リーチングのはやさは年間に0.1~0.2%と計算される。この値は Sr-90 の半減期28年、Cs-137 の半減期30年に比べてかなり小さい値であって、これから一度地上に降って来た放射性物質は、除去する術がないと考えた方がよさそうである。このようにリーチングされにくいという悪条件のために、土壌によってはぐまれる植物、およびそれを食べる動物、および人体内の放射能汚染がもたらされる。

土壌のイオン交換能についてはいくつかの研究があるが、土壌が粘土鉱物を含む割合が多いほど、また腐植物質を（いわゆるヒューマス）を含む割合が多いほど放射性物質を捕捉する力が大きい。しかし粘土鉱物や腐植を多く含む土壌は、いわゆる良質の土壌であって、農耕土壌の大部分はこれである。前にのべた通り、これらの土壌粒子に附着した放射性物質は、かんたんな酸洗いくらいでは除去されず、その一部だけが植物に摂取される。その量をきめるために便宜上、土壌をあたたかい酢酸アンモニウムの水溶液で処理し、そのときに溶出する放射性物質を交換可能なものとしてその量を互に比較する。