

フリッシュ・パイエルスの覚書

The Frisch-Peierls Memorandum

Otto Frisch, Rudolf Peierls

添付の詳細報告書は、原子核に内蔵されているエネルギーをエネルギー源とする「超強力爆弾」(super-bomb)製造の可能性を述べたものである。この超強力爆弾の爆発で放出されるエネルギーは、ダイナマイト 1,000 トンほぼ匹敵する。このエネルギーは小さな体積内で解放され、太陽の内部にも匹敵する温度となる。その爆風は、広範囲にわたって生命を破壊する。その範囲の推測は困難であるが、大都市の中心部をカバーしうる。これに加えて、この爆弾が放出するエネルギーの一部は放射性物質の生成に利用され、非常に強力な危険な放射線を放出する。この放射線の影響は爆発直後が最も大きく、徐々に減衰するが爆発後数日間、そこに立ち入る人間は死亡する。この放射能の一部は風で運ばれて汚染を拡大し、風下数マイルで人が死ぬこともありうる。このような爆弾を製造するためには、相当量のウランを処理して、ウランから含有量約 0.7% の軽い同位体 (U235) を分離する必要がある。このような同位体を分離する方法が最近開発されたが、これは非常に時間のかかる方法で、またその化学的性質に起因する技術的困難のためウランには適用されていない。しかし、これらの困難は決して克服できないものではない。大規模化学プラントの経験が不十分なためそのコストを正確に見積もることは難しいが、決して法外なものではない。

添付の詳細報告書は、原子核に内蔵されているエネルギーをエネルギー源とする「超強力爆弾」(super-bomb)製造の可能性を述べたものである。この超強力爆弾の爆発で放出されるエネルギーは、ダイナマイト 1,000 トンほぼ匹敵する。このエネルギーは小さな体積内で解放され、太陽の内部にも匹敵する温度となる。その爆風は、広範囲にわたって生命を破壊する。その範囲の推測は困難であるが、大都市の中心部をカバーしうる。

これに加えて、この爆弾が放出するエネルギーの一部は放射性物質の生成に利用され、非常に強力な危険な放射線を放出する。この放射線の影響は爆発直後が最も大きく、徐々に減衰するが爆発後数日間、そこに立ち入る人間は死亡する。

この放射能の一部は風で運ばれて汚染を拡大し、風下数マイルで人が死ぬこともありうる。

このような爆弾を製造するためには、相当量のウランを処理して、ウランから含有量約 0.7% の軽い同位体 (U235) を分離する必要がある。このような同位体を分離する方法が最近開発されたが、これは非常に時間の

かかる方法で、またその化学的性質に起因する技術的困難のためウランには適用されていない。しかし、これらの困難は決して克服できないものではない。大規模化学プラントの経験が不十分なためそのコストを正確に見積もることは難しいが、決して法外なものではない。

この超強力爆弾の特徴は、約 1 ポンドの「臨界量」が存在することである。分離したウラン同位体がこの臨界量を超えると爆発するが、臨界量以下であれば絶対に安全である。従って、爆弾の製造にあたってはそれぞれ臨界量より小さい、2 つ（あるいはそれ以上）の部分に分けて製造し、輸送時にはこれらの部品を互いに数インチの距離隔てておけば、過早期爆発の危険は回避しうる。爆弾には、起爆時に 2 つの部品を合体させる機構を備える。両者が合体して臨界量を超えると、大気中に常在する透過放射線の影響により、せいぜい 1 秒以内に爆発が始まる。爆弾の部品を合体させる機構は、臨界条件が満たされた直後に爆発する可能性があるため、速やかに稼働する必要がある。この場合、爆発ははるかに弱いものとなる。この可能性を完全に否定することはできないが、このような失敗は 100 個のうち 1 個とすることは容易であり、いずれの場合も爆発は爆弾そのものを破壊するには十分な程度であることから、あまり重大な問題とはならない。

このような爆弾の戦略的価値を論じる立場にはないが、以下の点は確実と思われる。

1. 武器として、超強力爆弾は事実上無敵である。その爆発力に対抗しうる材料、構造は存在しない。この爆弾を前線突破に使うことを考える場合、放射線のため数日間は誰もその地域に近づくことはできず、防御側がそこを再占領することも同様に不可能となることを銘記する必要がある。その地域に安全に再突入できる時期を最も正確に判断できる側に有利となり、これは爆弾の位置を予め知っている攻撃側に有利となると思われる。

2. 放射性物質は風によって拡散するため、多くの民間人を殺さずに使用することは不可能であることから、我が国の兵器としては不相当である可能性がある。(海軍基地付近で爆雷としての利用が考えられるが、その場合も洪水や放射能による市民生活への損害は大きいと思われる)。

3. 他の科学者が同じことに気づいているか否かは不

明であるが、この問題に関係する理論的データはすべて公表されており、ドイツが実際にこれを開発している可能性は十分にある。同位体を分離するためのプラントは、人目につく大きさである必要はないため、これが事実か否か調べることは難しい。これに関しては、ドイツ支配下のウラン鉱山（主にチェコスロバキア）の開発状況や、ドイツが最近海外で購入したウランに関するデータが参考となる。最も優れた同位体分離法を開発したK・クルシウス博士（ミュンヘン大学物理化学部教授）がプラントを管理している可能性が高いことから、その所在や近況は重要な手がかりになりうる。一方、ウランの同位体分離により超強力爆弾を製造できることを、ドイツではまだ誰も気づいていない可能性もある。ウランの分離と超強力爆弾の関係に関するいかなる風説もドイツの科学者をその道に進ませる可能性があることから、本報告の秘密は極めて重要である。

4. ドイツがこの兵器を保有している、あるいは将来保有するであろうと仮定すると、有効かつ大規模な使用に耐えるシェルターは存在しないことを知る必要がある。最も効果的な報復は、同様の爆弾による反撃である。従って、たとえこの爆弾を攻撃手段として使用しないとしても、可及的速やかにその製造を開始することが重要である。必要量のウランの分離には、最も恵まれた条件下であっても数ヶ月単位を要することから、そのような爆弾がドイツの手にあると判明した時点で製造を開始するのでは明らかに遅く、従って本件は非常に緊急を要する。

5. 予防手段として、このような爆弾の放射線の影響に対処するため、探索部隊を配備することが重要である。その任務は、測定器を携行して危険地帯に接近し、危険の程度、期間を明らかにして、人々が危険地帯に入るのを阻止することである。放射線は非常に強い線量であれば即死するが、弱い線量の場合は遅発性障害の原因となりなり、危険地帯の周辺部にいる者は手遅れになるまで予兆がないことから、これは非常に重要である。自らを防護するため、探索部隊は自動車や飛行機で危険地帯に入り、空気汚染の危険を避けるため、機内は密閉し、酸素ポンペを携行する必要がある。また隊員は、人間が短時間に被曝できる最大線量を正確に知っておかなければならない。この安全限界は今のところ不詳であり、そのための生物学的研究が緊急に必要である。

上述の結論の信頼性については、超強力爆弾製造の経験は皆無であり、直接の実験に基づくものではないが、大部分は近年の核物理学研究により非常によく確立された事実に基づいたものである。唯一の不確定要素は、爆弾の臨界量に関する点である。我々は、臨界量はおよそ1ポンドであることについてかなり確信があるが、この推測は未確認の理論的なアイデアに依存

したものである。臨界量が我々の推測より大きい場合、爆弾製造における技術的な困難はさらに大きなものとなる。この問題は、少量のウランが分離できればされればすぐにでも解決できるものであり、その重要性に鑑み、少なくともこの段階に達するために直ちに行動すべきであると考ええる。同時に、一定の実験を行えば、たとえ絶対確実な答が得られないにせよ、その結果が肯定的なものであれば、我々の結論を強く支持するものとなる。

ウランの原子核連鎖反応に基づく超強力爆弾の製造について

ウランの原子核連鎖反応に基づく「超強力爆弾」の製造については、これまで多くの議論が行われ、その可能性を否定するような意見もある。ここでは、これらの議論の中で見落とされてきたと思われる可能性を指摘し、議論したい。

ウランは、2つの同位体、99.3%のウラン238、0.7%のウラン235、から構成される。ウランの原子核に中性子が衝突すると、(1)散乱（エネルギーが0.1MeV以上の場合、中性子が方向を変えてエネルギーを失う）(2)捕獲（中性子が原子核に取り込まれる）、(3)核分裂（原子核が2つに分裂し約200 MeVのエネルギーを放出する）、という3つの現象が起こりうる。連鎖反応の可能性は、核分裂の際に中性子が放出され、この中性子の数が1より多い場合に考えられる。2つの別個の実験から、最も考えられる数字は2.3である。しかし、大きな通常のウラン塊では、非常に多くの中性子が非弾性散乱によって、ウラン238により強く吸収されるエネルギー領域にまで減速されるため、連鎖反応が発生しないことが示されている。

ウランと水を混合することにより、中性子のエネルギーを低下させ効率を高めることにより、連鎖反応を可能とするいくつかの試みがある。しかしこの方法でも、連鎖反応を維持することが不可能であることはほぼ確実とおもわれる。

水素を含み、低速中性子の作用に依存する方法では、反応が遅すぎて超強力爆弾は製造できない。中性子を減速するのに必要な時間は約 10^5 秒で、中性子がウラン原子核に衝突するまでの時間は 10^{-14} 秒である。この反応では、中性子の数が $e^{\tau t}$ のように指数関数的に増加する。ここで τ は少なくとも 10^{-14} 秒である。温度が数千度に達すると爆弾の容器が破壊し、 10^{-14} 秒以内にウランが中性子を放出するに十分な程度まで膨張し、反応は停止する。従って、放出されるエネルギーは容器を壊すのに必要なエネルギーのわずか数倍で、通常の強力な爆薬と同程度である。

ボーアは、低速中性子による核分裂は稀少同位体ウラン235によるもので、これは通常の同位体ウラン238

よりも全体としてはるかに高い核分裂確率を持つという強い論拠を示した。近年、同位体の効果的な分離方法が開発され、中でも熱拡散法は簡単で、かなり大規模な分離が可能である。

原理的には、ほぼ純粋なウラン 235 をこのような爆弾に使用可能であるが、この可能性についてはこれまで真剣に検討されていない。我々はこの可能性について検討し、適当な量のウラン 235 が極めて効率的な爆薬となりうるという結論に達した。

高速中性子によるウラン 235 のふるまいは、実験的には不明であるが、簡単な理論的検討からはほぼすべての衝突で核分裂が起こり、いかなるエネルギーの中性子も有効であると結論できる。従って水素を加える必要はない。高速中性子による反応は非常に高速に進み、物質が膨張して反応が停止する前に全エネルギーのかなりの部分が放出される。

ある物質の 臨界半径 r_0 、すなわち核分裂によって生じる余剰中性子が、表面から失われる中性子にちょうど等しくなる球の半径は、中性子の平均自由行程と一定の比となり、これは密度に反比例する。従って、物質をできるだけ高密度状態、すなわち（おそらく焼結または鍛造により）金属状態にすることが得策である。ウラン 235 の場合、明らかな散乱がなく、1 回の核分裂で 2.3 個の中性子が放出されると仮定すると、臨界半径は平均自由行程の 0.8 倍であることが分かる。金属状態（密度 15）で、核分裂断面積を 10^{23} cm^2 とすると、平均自由行程 2.6 cm, r_0 2.1 cm で、これは質量 600g に相当する。半径が r_0 より大きい金属ウラン 235 の球体は、爆発性を持ち、爆弾の大きさとしては 1kg 程度が適当と思われる。

反応の速度は簡単に見積もることができる。核分裂で放出される中性子の速度は約 10^9 cm/s で、ウラン原子核に衝突するまでに 2.6cm 移動しなければならない。臨界量より充分大きい球体では、中性子の脱出による損失は小さいため、個々の中性子は寿命 2.6×10^9 秒で核分裂を起こし、2 個の中性子を生むと仮定できる。時間と中性子密度の増加を表わす式 $e^{t/\tau}$ において、 τ は約 4×10^9 秒で、低速中性子による連鎖反応に比べて非常に短い。

ほとんど全てのウランが反応が消費されるまで反応が続くと、温度は $10^{10} \text{ }^\circ\text{C}$ 、圧は 10^{13} 気圧のレベルまで上昇する。このような極端な条件下での物体のふるまいを正確に予測することは難しく、数学的にもかなり困難である。大ざっぱな計算であるが、我々は物体が膨張して反応が停止するまでに解放されるエネルギーについて以下の式を得た。

$$E = 0.2 M (r^2 / \tau^2) \sqrt{[(r/r_0)-1]} \quad \text{式 (1)}$$

ここで M: ウランの総質量, r: 球体の半径, r_0 : 臨界

半径, τ : 中性子密度が e 倍になるのに要する時間。直径 4.2cm ($r=2.1\text{cm}$), $M=4700\text{g}$, $\tau = 4 \times 10^9$ 秒とすると, $E = 4 \times 10^{22}$ erg となり, これは全核分裂エネルギーの約 1/10 である。直径 8cm ($M=32\text{kg}$) では, 式 (1) によると全エネルギーが解放される。半径が小さくなると, 式 (1) からわかるように, r が r_0 に近づくにつれて τ が増加するため, 効率は急速に低下する。5kg の爆弾から解放されるエネルギーは, ダイナマイト数千トンに匹敵する。1kg の爆弾では約 1/500 に減ずるが, それでもまだ恐るべきものである。

このような球体は 2 つ（またはそれ以上）の部分に分け、爆発させる時に初めて合体させることが必要である。反応を開始させるには中性子 1 個で充分であり、実際には宇宙線に由来する中性子が毎秒数個、爆弾を通過するので、ひとたび合体すれば 1 秒以内に爆発する（ウランから発生する α 線が低原子量の不純物に作用して発生する中性子は、ウランの純度が充分であれば無視しうる）。半径 3cm 以下の球体であれば、2 つの半球を適当な構造で隔てておき、必要なときにこれを取り外してバネで合体させることができるであろう。さらに大きな球体の場合は、個々の部品が安定であれば、2 つ以上に分けることができる。

臨界量サイズよりわずかでも小さい球体は、全く安全で無害であることは強調されるべきである。球体を徐々に大きくしながら、既知の中性子照射下で球体から発生する中性子の数を測定すれば、早期爆発の危険なく、臨界量を正確に決定できる。

ウラン 235 の分離については、Clusius らが開発した熱拡散法が、大量の需要に対応できる方法であると知られる。気体ウラン化合物、例えば六フッ化ウランを、異なる温度に保たれた 2 枚の垂直な面の間に置くと、軽い同位体は高温の表面付近に集中する傾向があり、対流によって上方に運ばれる。冷たい面を下降する流れとの交換により、分画作用が得られ、まもなく上端付近の気体が下端付近よりも軽元素を著しく多く含む平衡状態に達する。

例えば、直径 3cm, 長さ 150cm, 直径 3cm, 2mm 間隔の同心円状の管を使うと、管の両端で約 40% の稀少同位元素濃度差が得られ、平衡を大きく崩すことなく上端から 1 日 1g を抽出できる。

高濃度ウラン 235 を大量に生産するためには、非常に多くのこの分離管を直列だけでなく並列にも配置する必要がある。純度 90% のウラン 235 を 1 日 100g 生産する場合、約 10 万本の分離管が必要になると推定される。これは非常に多いように思えるが、同じ有効面積内によりコンパクト、より安価なシステムを設計することは確実に可能であろう。

爆発による破壊作用に加え、爆弾の材質全体が高放射

性物質に変化する。この放射性物質が放出するエネルギーは、爆発で解放されるエネルギーの約 20%に達し、爆発後長時間経過しても、生物に致命的な影響を与えることになる。

ウランの核分裂では、だいたい 1 秒から 1 年の期間に、非常に多くの放射性物質が生成される。放射線の強度は、既知の様式で減衰し、概ね時間に反比例する。爆発の翌日でも、放射線は 1,000kW の電力消費、あるいは 100 トンのラジウムの放射線に相当する。

この放射線のヒトへの影響の推定は、爆発後の放射性物質がどうなるか予測することが難しいため、不正確にならざるを得ない。その多くは、空気中に飛散して風に乗って運び去られるであろう。この放射性物質の雲は、長さ数マイルにわたると予想され、その範囲にいる者をすべて殺すであろう。もし雨が降れば、放射性物質は地表に運ばれて付着し、数日後でも汚染地域に立ち入ると危険な放射線に曝露されることになり、危険度はさらに高くなる。放射線物質の 1%が爆発付近の瓦礫に付着し、その瓦礫が例えば 1 平方マイルの面積に広がれば、この地域に立ち入る者は、爆発後数日経っても深刻な危険に曝されることになる。

上記の試算は、透過放射線の致死量を 1,000 レントゲンと仮定している。放射線治療専門医の意見を求め、さらに生物学的研究を行えば、その危険性をより正確に知ることができるかもしれない。不確実性の主な原因は、このような状況下での物質の挙動に関する知識の欠如である。高性能爆薬の専門家であれば、この問題の一部を解決できる可能性がある。

効果的な防護はほとんど不可能である。家屋による保護が有効なのは、危険地帯の周辺部でのみである。深い地下室やトンネルは、非汚染地域から空気を供給できれば、放射線の影響に対して比較的安全である（放射性物質の一部は稀ガスなので、通常のフィルターでは阻止できない）。

放射線は何時間も経ってからでないと感じられず、その時は既に手遅れの可能性もある。従って、電離を測定して危険区域を正確に把握し、人々の立ち入りを防げるような組織が非常に重要である。