

日本の原爆開発を回顧する

(I) — 温故知新 —

岡本祥一

予科5-7

航空16-4

(川口市)



【まえがき】

仁科芳雄、日本の原子物理学の父と呼ばれる科学者である。太平洋戦争末期、陸軍の要請により理化学研究所の一室で原爆開発を試みた。その経緯、経過について日本国および日本政府の正式記録は無い。そのため憶測を含めた様々な文書が出回っている。

筆者は、1950年9月、理化学研究所仁科研究室に研究員として採用され、原爆開発に直接参加された先輩方の警戒に接する機会に恵まれた。ただ、その当時、原爆研究については全く聞かされたことは無かった。最近偶然目にした書物に日本の原爆開発の歴史に関する記事があり、その仕事に従事された方々の中に旧知のお名前を見出し、しきりに懐旧の念がこみ上げてきた。そして日本の興亡をかけた重要課題に必死に努力された諸先輩の苦勞の一端でも知りたいと思い、本稿の起草を思い立った次第である。

本文を3部に分けることとした。

「第1部 原子エネルギー」

原爆開発の経緯、経過を知るために必要な原子エネルギーに関連する基礎的な知識について概説する。

「第2部 原子エネルギー開発の経緯」

中性子の発見(1932年)に始まる急

速な原子核物理発展経過について述べる。

「第3部 米国における原爆開発の概要」

1939年頃のウラン核分裂発見に始まる、アメリカを中心とする原爆開発の経緯、経過について述べる。

「第4部 日本における原爆開発の経緯」

1940年春頃から始まる我が国での動き、そして中止に追い込まれる経緯を記す。終戦によりほとんどの重要資料が焼却されたため、不確実な情報、記事が多い。正確を期するため文献、情報の収集に努力した。

原爆に関する諸問題は決して過去のものではない。とりわけ北朝鮮による最近の核開発の動きは我が国にとり極めて大きな脅威である。また関連して原子力発電の開発に含まれる多くの課題は我々にとり身近なものである。これらの点についても必要に応じて触れることとした。

【第1部 原子エネルギー】

1. 原子核反応により放出されるエネルギー

原子爆弾、原子力発電等に利用される原子力あるいは原子エネルギーの源泉は、核反応に伴う質量欠損である。核反応により原子核の質量の一部が失われ、失われた質量がエネルギーに変換されるのである。

1905年、アインシュタイン(ユダヤ系ドイツ人、米国に亡命。1879-1956)は特殊相対性理論の帰結として、物質とエネルギーは等価であるとの概念を提出した。

質量 m の物質に内在するエネルギー E は光速 c を含む次式で示される。

$$E = mc^2$$

質量が失われることによりエネルギーが放出される核反応は2種類ある。一つは、²³⁵Uのような重原子の核分裂反応によるものであり、他の一つは、水素、ヘリウム等

の軽い原子核を原料とする核融合反応である。例えば、太陽の中心では4個の水素核から1個のヘリウム核を生じる核融合反応が起きており、その過程で一部の質量が失われ、その分がエネルギーとして放出されている。本稿では重原子の核分裂に伴うエネルギーの放出を取り扱うことになる。

原子核は陽子と中性子とから成り、例えば ^{235}U と記されるウランの質量数「235」は、陽子の数「92」と中性子の数「143」の和であたえられる。陽子の数は原子番号と一致し、原子核を取り囲む電子の数と同じであって化学的性質を支配する。

1個の ^{235}U は1個の中性子を捕獲吸収して質量数95～100の原子と質量数130～140の原子に分裂し、平均して2.5個の中性子を放出する。その際に平均 $0.35 \times 10^{-27} \text{kg}$ の質量が失われ、その分がエネルギーとなって放出される。光速 c を約 $3 \times 10^8 \text{m/sec}$ としてアインシュタインの式に代入し放出されるエネルギーを求めると次の値となる。

$$E(1 \text{ 原子}) = 0.35 \times 10^{-27} \text{kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/sec})^2 \\ = 3.15 \times 10^{-11} (\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}^2 = \text{J})$$

1gの ^{235}U は 2.55×10^{21} 個の原子を含み、その核分裂により発生するエネルギー E (1 g) は、

$$E(1 \text{ g}) = 3.15 \times 10^{-11} (\text{J}) \times 2.55 \times 10^{21} \\ = 8 \times 10^7 (\text{kJ})$$

TNT火薬1gの燃焼エネルギーは約4.2kJであるから、僅か1gのウラン235からTNT火薬約20トンに匹敵する莫大なエネルギーが生み出されることになる。

広島型原子爆弾に使われた ^{235}U は約60kgと言われている。実際にはその一部、約10%だけが有効であったとの見方がある。それにしても約12万トンものTNT火薬に匹敵する原爆の炸裂が一瞬の壊滅を引

き起こしたことになる。そのエネルギーは物を破壊する力学的エネルギー、物の温度を上昇させる熱エネルギーおよび強力な放射線となって凄まじい破壊作用を引き起こしたのである。

原子力発電は、 ^{235}U の核分裂反応を巧みに制御し、発生した熱エネルギーで水を加熱し、得られた高温高压の水蒸気を用いてタービンを回転させ、電気エネルギーを取り出す仕組みである。

II. 核分裂反応

1. 核分裂の連鎖反応

ウラン金属の塊の中で自然に発生した微量の中性子が ^{235}U に吸収され、核分裂が起こる。中性子1個を捕獲した1個の ^{235}U は、核分裂して平均2.5個の高速（高エネルギー）中性子を放出する。例えば1個の中性子により2個の中性子が放出される場合、2個の ^{235}U が核分裂を起こし、4個の中性子を放出する。これを捕獲して4個の ^{235}U が核分裂し第3世代では $(2)^3 = 8$ 個の中性子を放出する（図-1参照）。このような反応が次々に進み、分裂する核の数もネズミ算的に急速に増加する。これが核分裂の連鎖反応である。もし十分な濃度そして量の ^{235}U があり、核反応により放出された中性子が損失無く全て ^{235}U に吸収捕獲されれば、核分裂反応が急速に起こり爆発する。

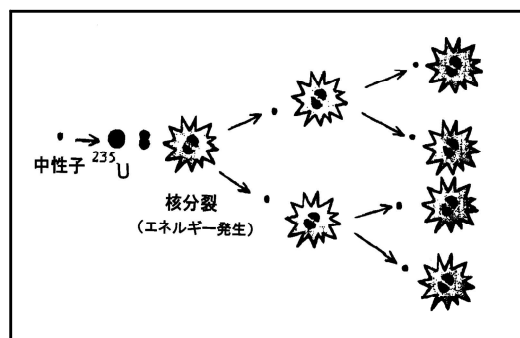


図-1 連鎖反応の概念

2. 臨界量

実際にはウラン金属の中で発生した中性子はその全部が核分裂反応に利用されるわけではない。濃縮ウラン金属塊の量が少なく大きさが小さければ放出された中性子はかなりの部分が外に飛び出し無効になる。金属塊の寸法を大きくする、つまりその量を次第に増やすと外に飛び出して無効になる中性子の割合は減り、核分裂反応が次第に盛んになる。さらに量を増すと、連鎖反応が持続して起こる状態になる。この状態を核分裂反応が臨界に達した、または臨界状態になったと称している。臨界に達する核分裂物質の最少量が臨界量である。臨界量を超すと超臨界状態となり、中性子の発生量がネズミ算的に急激に増加し核爆発に至る。

核分裂物質の臨界量は形状により異なる。一般にその形状が細長い、あるいは薄板状であれば、つまり同じ物質質量に対して表面積が相対的に大きい場合、内部で発生する中性子の多くが外へ飛び出してしまい、核分裂反応に寄与しなくなる割合が増し、臨界量は大きくなる。球体の表面積は最少であるから臨界量は最少となる。

また、臨界量は密度が増せば減少する。圧力を加えれば密度が増し、核間距離が小さくなって核反応に寄与する中性子の有効量が増し臨界量は少なくなる。

核分裂物質の塊を、中性子が反射される材料（ウラン金属、水など）で取り囲んでも核反応に寄与する中性子の数が増し臨界量は減少する。

このように塊としての核分裂物質の形状やそれが置かれている周囲の状況は臨界量に影響する。このような次第で、核分裂物質の形状、配列の仕方、密度を変え、更に注入する中性子の量を制御することにより臨界量の制御が可能である。つまり核反応

の進み方を制御することができる。

1999年9月に起きた東海村のJCO(株)での臨界事故は、臨界量を無視したために起こった典型例である。

3～4%の ^{235}U を含む濃縮ウランの硝酸水溶液（濃度18.8%）を沈殿槽に送り込んだところ、臨界量を超えてしまい、 ^{235}U の核反応が急速に進み大量の中性子が発生、人身事故を起こしたものである。正常の操作では沈殿槽は細長い筒状の容器を用いることになっており、この形では発生した中性子は外部に逃げてしまい、同じ量の硝酸水溶液を入れても臨界にはならない。しかし事情を知らずにすんぐりした形の容器に入れたため、発生した中性子が外部に漏れることなく有効に利用される割合が増した。さらに沈殿槽の周りは冷却のため水槽が取り囲んでいた。水は中性子の良い反射材であり溶液中の中性子数が増加した。これらの条件が重なり中性子の利用効率が増加したため超臨界状態になったものである。裸の原子炉が突然出現したような状況であった。2名の死者の他に、工場周辺の住民に中性子による深刻な健康障害を引き起こした。

沈殿槽内のウランが連鎖反応を起こすためには、引き金となる中性子が必要である。この事故の場合、中性子の発生は自然に起こっている。その原因の解析によれば、①ウランの崩壊により放出される α 粒子と沈殿槽内物質との核反応で発生する中性子、②ウランの自発核分裂による中性子、③宇宙線により誘起された核反応から生じた中性子、などが引き金になったと考えられている。

3. 誘導核分裂と自発核分裂

核分裂には前述の ^{235}U の例のように、外部から中性子の照射を受けて核が崩壊す

る誘導核分裂と、中性子やその他の粒子による衝撃を受けることなく自発的に分裂が始まる自発核分裂との2種類がある。プルトニウム²³⁹Puの同位体である²⁴⁰Puは高い確率で自発核分裂を起こし中性子を放出する性質がある。このため同位体としての²⁴⁰Puを含むプルトニウムは核分裂を起こし易く、利用に当たり特別な配慮が必要となる。ウランも極く僅かではあるが自発核分裂を起こし中性子を放出する。

4. 核物質

核分裂を起こす核種は、質量数が偶数であるか奇数であるかにより核分裂の仕方が異なる。奇数の質量数を持つ²³³U, ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Puは中性子を捕獲して核分裂を起こす。これらを核分裂性物質あるいは核物質と言う。

偶数の質量数を持つ²³²Th, ²³⁸U, ²⁴⁰Puは原子炉内で中性子を捕獲して奇数の質量数を持つ核分裂性物質となる。この種のものを親物質又は核原料物質という。

これら核物質、核原料物質のうち天然に存在するのは²³⁵Uだけであり、他は全て原子炉内で中性子捕獲反応により作られる。

原爆材料としてとりわけ注目されている²³⁹Puは、黒鉛原子炉内で²³⁸Uから中性子1個を捕獲する核反応により作られる。また原子力発電用原子炉に挿入される核燃料棒の中でも同様に²³⁸Uが1個の中性子を捕獲して²³⁹Puに変換される。このため、使用済の核燃料棒には²³⁹Puがかなりの量で含まれている。原子力発電に使った核燃料棒の燃えかすから²³⁹Puを抽出すれば原爆材料が容易に入手できるのである。

西側各国が、北朝鮮やイランの原子力発電所建設に対して拒否反応を示し、また使

用済核燃料棒の管理に神経を使うのは上述の理由による。

5. 核分裂により発生する中性子

核分裂に伴って放出される中性子には、即発中性子と遅発中性子の二種類がある。

即発中性子は核分裂と同時に高速（高エネルギー）中性子として放出され全体の99%を占める。即発中性子による核連鎖反応を急激に起こすよう工夫されたものが原爆である。即発中性子は短時間に消滅する、つまり寿命が極めて短い性質がある。

遅発中性子は、核分裂により新しく生成された核種から放出されるものであり、分裂する核から直接放出される中性子ではない。低エネルギーかつ低速で放出量も0.6%と少ない。しかし核分裂から中性子が吸収され消滅するまでの時間、つまり寿命が長いことから原子炉内の急激な出力変化を制御することができ、原子炉の制御に重要な役割を果たしている。

【第2部 原子エネルギー開発の歴史】

I. 中性子の発見

1932年、チャドウィック（英、1891～1974）は、ポロニウムからの α 線をベリリウム箔に当てると異様にエネルギーの高い電氣的に中性の放射線が放出されることに注目し、これが中性子であることを確かめ発表した。それまでに知られていた原子を構成している基本粒子は陽電荷をになう陽子と陰電荷をになう電子だけであった。中性子の発見は原子核物理学の発展に強い刺激を与えた。ウランの核分裂発見の契機となり、更には原子爆弾および原子力発電開発の端緒となったのである。チャドウィックは1935年度ノーベル物理学賞を受賞している。

原子核は中性子と陽子（総称してこれらを核子と言う）により構成されていることが明らかにされた。これら核子を原子核の極めて狭い空間内に閉じ込めている“核力”についての検討が一層盛んになった。1935年湯川は、この“核力”は中間子によるものであるとの理論を発表した。核子の間に中間子と呼ばれる粒子が飛び交っており、この粒子が行ったり来たりすることにより核力を生み出すというのである。1947年に至り宇宙線の中に中間子の存在が確認され、1949年湯川は日本人初のノーベル物理学賞に輝いたのである。

II. 核分裂の発見

ベルリンのカイザー・ウィルヘルム研究所のハーン（ドイツ、1879-1968）、シュトラスマン（ドイツ、1902-68）およびマイトナー（オーストリア、ユダヤ人、1878-1968）ら3人は、中性子が発見されるや、ウランに中性子を照射し吸収させれば、天然に存在する最も重い原子であるウランよりも重い、新しい超ウラン元素が得られるのではないかと考え、研究を開始した。超ウラン元素を確認できれば世紀の大発見となる。しかし、予想に反して、質量数の少ない ^{56}Ba や ^{57}La が生成されることを見出した。1938年12月、ハーンは当時ナチスの迫害によりドイツからスウェーデンに逃れていた共同研究者のマイトナーにこの研究結果を報せた。マイトナーは彼女の甥のフリッシュと共に解析に当たり、ウランが核分裂した結果によることを理論的に明らかにした。研究結果は1939年学会誌に発表され、当時の核物理学者に強い衝撃を与えた。ドイツ圏でのこの一連の研究が核分裂の発見とされている。ハーンは1944年、この研究によりノーベル化学賞を得ている。

余談であるが、イダ・ノダック（ドイツ）はウラン原子核が中性子を吸収すると必ずしも中性子が1個増加した超ウラン元素にはならず、原子核が分裂して既に知られている小さな原子核になるであろう、つまり核分裂が起こるであろうという論文を1934年の頃発表している。実にハーン等が核分裂を発見する4年も前のことであった。しかしこのノダックの論文は完全に無視されてしまった。極く一部の者を除いて、当時の核物理学者は僅か1個の中性子を取りこむだけでウランが分裂するはずはないと思い込んでいたためである。学者に限らず、人間の思い込み、先入観の怖さを痛感する話である。

III. 連鎖反応の発見

レオ・シラード（ハンガリー、ユダヤ人、米国に亡命、1898-1964）は、ハーン等がまだ核分裂を発見していない1933年頃から、次のような驚くべき発想を既に持っていた。中性子が原子核に衝突すると原子核は壊れて分裂するのではないか。もしも1回の分裂により、2個の中性子が飛び出せば、それが次の原子核に衝突して4個の中性子を放出し反応が急速に進むのではないか。つまり連鎖反応を既に頭に描いていたのである。さらに、核分裂により膨大なエネルギーが放出されるのではないか。若しそうなら想像を絶する強力な爆弾が可能ではないかとも考えていた。

ナチスに追われて米国に亡命したシラードは、ハーン等によるウランの核分裂発見の報告から、自分の解釈が正しいことを知り、当時イタリアから亡命してきたエンリコ・フェルミ（イタリア、1901-54）と共同して核分裂連鎖反応の研究に没頭した。1939年、ウランの中で中性子が倍増する現象を発見し、連鎖反応が起こること

を確認した。彼の発想が現実のものとなったのである。

IV. 原爆開発の発端

ハーン等によるウランの核分裂の発見の情報は直ちに世界に広まった。その頃すでにシラードらにより予見されていた連鎖反応と結び付けて、世界の核物理学者は莫大なエネルギー放出が可能であることに直ちに気付き、その軍事利用（原子爆弾）の危険性に注目し始めた。米、英、独、仏、露、日等の諸国での原爆開発を促す契機となったのである。欧州ではドイツがヨーロッパを席卷し、太平洋戦争がまさに始まろうとする風雲急な時代、1939年から1940年にかけてのことであった。

後述するマンハッタン計画（米国原爆開発計画）に参画したシラードとフェルミは1942年12月、²³⁵Uを濃縮した試料で、世界で初めて自己持続する核分裂連鎖反応を人工的に起こすことに成功した。広島型原爆開発成功への第1歩であった。

シラードは研究結果を学術誌に発表するよりは、特許を申請することを好んだ。

シラードとフェルミによる、原子炉を含む多くの核分裂応用の特許が残されている。元特許庁審査官の川島氏(21-7)によれば、我が国へも戦前外国から核反応を利用する特許の申請があったそうである。発明未完成との理由で特許にならなかった。この特許申請がシラードとフェルミによるものかどうか確認は困難であり詳細も分からないが、興味深いものがある。

【筆者紹介】

- ・昭和 25 年 3 月東京工業大学電気化学科卒業
- ・昭和 25 年 9 月理化学研究所に仁科研究室研究員として入所、機能性材料の研究に

従事。

- ・昭和 42 年 7 月工学博士(東京工業大学)
- ・昭和 54 年 4 月国立長岡技術科学大学

電気系教授

- ・平成 2 年同校名誉教授
- ・平成 2 年 4 月国立長岡工業高等専門学校校長
- ・平成 8 年 4 月同校名誉教授
- ・平成 8 年 9 月－平成 10 年 7 月 国際協力事業団長期専門家としてバンコックに滞在、工科大学の教育支援事業に従事。

【主な著書】

[マグネトセラミックス] 岡本祥一、近桂一郎. 技報堂出版（株）、1985.5（1刷）、1995.5（2刷）

[磁気と材料] 岡本祥一「化学 One Point」第23巻, 共立出版。1991.11(1刷)、1995.5(3刷)

平成22年1月号 秩父106号

日本の原爆開発を回顧する (Ⅱ) — 温故知新 —

岡本祥一 予科5-7
(川口市) 航空16-4

第3部 米国における原爆開発の概要

1. マンハッタン計画

核分裂の発見（39年）により核爆発が起こりうることを確信したレオ・シラード^{註1}（当時英国に亡命）はドイツでも原爆開発の計画があることを知り、英国の機関に原爆開発を進言した。しかしあまり関心を呼ばなかった。そこで米国のルーズベルト大統領宛にアインシュタイン^{註2}の署名を添えて信書を送りドイツに先駆けて核開発を

実施するよう進言した(39年8月)。核分裂連鎖反応が軍事目的に使用される可能性や、核爆発により甚大な被害を受ける可能性も示唆されていた。2カ月後の同年10月、この信書を目にしたルーズベルト大統領はウラン諮問委員会を設置、原子核研究計画の開始を指示した。この段階ではウラン爆弾はまだ不確定なものと見られていた。

検討が進むにつれてウラン爆弾の可能性が高まり、アメリカはウラン諮問委員会を吸収し、官、学、民の叡智を集めて国防審議会（National Defence Research Council）を設置、原爆材料となる²³⁵Uの濃縮手段実現に向けて検討を開始した。(40年6月)。

その前後、39年9月にはドイツがポーランドに侵入、第2次世界大戦が勃発し、40年6月にはパリが陥落、ヨーロッパは戦乱の渦に巻き込まれていた。41年3月にはイギリスを支援するために戦略物質援助法案がアメリカの議会で承認され成立した。41年12月8日には日・米の決戦が開始され、数日を経ずしてドイツとイタリアもアメリカに対して宣戦を布告した。

このような緊迫した世界情勢に対応してアメリカは国防計画の再編強化を進め、41年6月「Office of Scientific Research and Development」を設置し、国防審議会の検討結果を踏まえて核爆弾実現に向けて一層の努力を傾けることとした。具体的に²³⁵Uの濃縮と必要量の確保、およびその頃新しく発見(41年2月)された核分裂性物質のプルトニウムを製造する手段の確立、の二つを主要議題として活動を開始した。

ほぼ1年後の42年6月、NDRCおよびO SRDは原爆が実現可能で開発を遂行すべきであるとの答申をルーズベルト大統領に送った。この勧告を受け、国家プロジェク

トとして原爆開発を本格的に実施する決定が直ちに下された。いわゆるマンハッタン計画の発足である。

マンハッタン計画は陸軍の管轄下に置かれ、リーダーには工兵総監部レスリー・グロブス将軍が任命された。国を挙げての極秘の最優先開発課題として原爆開発が発足したのである。3年間で原爆を完成することを使命とした。目的達成のため、多くの科学者・研究者の他に数千人の軍人・軍属等を配置し、さらに最盛期には12万5千人の労働者が従事する、極めて大規模なプロジェクトとなった。費用は当時のドルで凡そ20億ドル(当時の日本の国家予算総額にも匹敵する金額)の巨額に達した。

材料となる高濃縮ウランはテネシー州オークリッジで、プルトニウムはワシントン州ハンフォードで生産され、ロスアラモスに運ばれて原爆に組み立てられた。原爆組み立ての中心となるロスアラモスの施設には、物理学者のオッペンハイマーが所長に選任された。ボーア、フェルミ、ノイマン、フリッシュ、ベーテ、ファイマン等ノーベル賞受賞者を含む世界的な著名科学者のほか、ハーバード大学、カリフォルニア大学など名門校の学生も計画に動員された。当時はコンピューターが実用化されていなかったために計算だけを任務として優秀な高校生も参加した。

45年8月、完成した爆弾が広島、および長崎に投下され日本は降伏、マンハッタン計画は与えられた使命を果たした。そして47年1月1日に発足した原子力委員会によりそのすべてが引き継がれた。

【註1】原爆開発に中心的役割を果たしたシラードは一般市民を対象とする都市への投下に強く反対し、海上に投下してその威力を示すにとどめるべきと主張した。しかしこの意見は採用されなかった。

【註2】アインシュタインは、ルーズベルト大統領に宛てたシラードの手紙に署名した以外、原爆開発には一切関与していない。アメリカ当局が彼の政治姿勢を警戒して、核開発計画（マンハッタン計画）が発足（42年6月）した事実を知らせなかったのである。後に原爆投下の甚大な被害を知り、アインシュタインはこの手紙に署名したことを大いに後悔している。その反省に立って57年カナダ、バグオッシュで湯川秀樹ら世界の著名科学者を集め第1回の会議を開催、核廃絶、平和運動の展開を世界に向けて発信した。バグオッシュ会議の発足である。

2 ウラン濃縮

天然のウランの大部分は ^{238}U であって、 ^{235}U は僅かに0.72%しか含まれていない。原爆の開発には ^{235}U を90%以上含む高濃縮ウラン金属の塊が大量に必要である。 ^{235}U の分離、濃縮技術の開発が大きな課題となった。

マンハッタン計画では、最初の段階ではガス拡散法、電磁分離法、熱拡散法が考えられていた。これらのどの方式も実験室規模では可能であっても、工場規模での実績は全く無かった。そこで、いずれの方法も採用し並行して開発を進めることとなった。これらのうち、熱拡散法プラントは非効率であることが明らかとなり45年初頭に中止された。遠心分離法は技術的に困難であるとして見送られた。ウラン濃縮にはガス拡散法と電磁分離法が主要な手段となったのである。まずガス拡散法により7%程度の ^{235}U を含む濃縮ウランを作り、これを電磁分離工場に送り90%以上の高濃縮ウランを作る、2段階の方式が主に採用された。

ウラン濃縮技術の情報は、従来の手法を

含めて核拡散防止の観点から国際的に機密情報として取り扱われており、不明な点が多い。

以下にマンハッタン計画で検討された手法および関連した事項について概要を述べる。

a ガス拡散法

気化したフッ化ウラン（ UF_6 ）を加圧して隔膜の設けられた気室に送りこむ。隔膜は数ナノメートルないし数十ナノメートルの極めて微細な孔が無数にあけられている多孔質構造となっており、 UF_6 分子がその中を通り抜けて行く。質量の小さい $^{235}\text{UF}_6$ のフッ化物がわずかに速く拡散するため孔を通りぬけた後に少し濃縮される。ただし、1回の操作では1.004倍程度しか濃縮されない。 ^{235}U を7%含有する濃縮ウランをうるためには数千段以上の濃縮処理が必要とされている。この手法による工場（K-25プラント）は45年初頭から本格的に動き初め、6月に入り濃縮ウランを電磁分離の工場に送ることが可能となった。原爆投下の僅か2ヶ月前である。

UF_6 は強い腐食作用があり取扱いに大きな危険を伴う。耐食性を強めるため構造材にはニッケル鍍金が施された。また38年には既にデュポンでテフロン系樹脂が開発されており、この系の樹脂を設備のパッキングやライニングに使用することで安全操作が可能となった。テフロンの開発は一見無関係に見えるが、原爆開発に大きな役割を果たしたことは注目すべきである。この例に見られるように、幅広い、底深い基礎技術の開発は現代でも重要であることに思いを致すべきであろう。ガス拡散法は実証されたウラン濃縮技術であり、現在も多くのプラントが稼働しているが、実際に採用されている多孔質隔膜の材質、正確な穴の

大きさや分布、製造法等の詳細は明らかにされていない。

b. 電磁分離法

電荷を荷なった原子あるいは分子（まとめて荷電粒子と呼ぶ）を真空槽の中で磁場を印加しながら加速する。荷電粒子の加速は電圧をかければよい。高速で移動する荷電粒子は電流と等価である。磁場は電流に対して直角に加える。フレミングの左手の法則により運動している荷電粒子は磁場の向きと電流の向きとに直角の向きに力（ロレンツ力）を受ける。軽い粒子はこの力により運動の軌跡が強く曲げられ重い粒子と分離することができる。化学的性質の同じ原子（同位体）などの分離に利用される質量分析器の原理である。²³⁵Uを含む分子は²³⁸Uを含む分子より少し軽いため、運動の軌跡がやや強く曲げられ分離することができる。

マンハッタン計画に参加したカリフォルニア大学のアーネスト・ローレンス（英、01－58）は、自身が発明し開発した粒子加速器としての60インチサイクロトロン^{註3}の経験を基に186インチの大型サイクロトロンをその頃建造中で、その主体である大型電磁石は既に設置されていた。彼はこの電磁石を質量分析器として転用し、²³⁵Uと²³⁸Uとの分離が可能であることを実証した。この発案により開発された装置はカリフォルニア大学の名前を取ってカルトロンと名付けられた。

【註3】サイクロトロンは、磁場を印加した真空槽の中で、磁場に垂直な平面内で円運動する荷電粒子に、その動きに同期した高周波電場を加えて加速する粒子加速器である（ブランコの動きに合わせれば、僅かな力でもブランコの振幅が増すのと同じ理屈である）。

カルトロンの主体は大型の電磁石であり、それを多数並べた巨大な工場（Y-12プラント）がオークリッジに建設された。楕円形タンクから成るアルファ・カルトロン96個を1シリーズとし、9シリーズが設置された。ベータ・カルトロンはやや小型の長方形タンク状で、1シリーズは36個のカルトロンタンクから成り、8シリーズが設置された。合計1152のカルトロンがY-12プラントに設置されたことになる。カルトロンの電磁石には莫大な量の鋼鉄、そして銅の欠乏のため導線には1万4千トンの銀が使われた。必要な電力を供給するために発電所も建設された。実に膨大な設備が造られたのである。

カルトロンの稼働は45年6月から本格的に始まり、ガス拡散法で7%程度に濃縮されたウランがまずアルファ・カルトロンへ送られ、更に最終段階としてベータ・カルトロンへ送り込まれ90%以上に濃縮された。約1カ月の短期間に、1発の原爆を作るに必要な高濃縮ウランを生産したのである。しかしこの電磁分離方式は電力消費が大きく、コストも高いので、戦後の46年には稼働が停止された。

【註4】原爆原料としての²³⁵Uを作るために重要な役割を果たしたカルトロンがサイクロトロンと類似した装置であったため、理化学研究所に当時建設されていた大型サイクロトロンが日本での原爆開発に利用されたのではないかと誤解され、アメリカ軍部により戦後直ちに（45年11月）東京湾海底に沈められるという悲劇の誘因となった。日本のサイクロトロンは仁科により純粋に科学研究を目的として建造されたものであって、当時²³⁵Uの分離に用いる計画は全くなかった。この程度の規模のサイクロトロンでは²³⁵Uの大量入手は不可能と計算していたのである。

この米軍の暴挙は米国内のA.ローレンスらサイクロトロンに関係する核物理学者に大きな衝撃を

与え、激しい抗議文が大統領や国防長官に送られた。この間の経緯は今村 昌氏（理研、元主任研究員）「放射線教育 vol.9, No.1, 05」に述べられている。

c. 遠心分離法

気化したUF₆を遠心分離器内で高速回転させると質量の大きい²³⁸UF₆は壁側に、質量の小さい²³⁵UF₆は中心の回転軸側に集まる。軸方向の対流により濃縮ガスを回収する。分離効率は回転数（回転胴の周速）が高いほど向上する。ガス拡散法に比べて反復回数は1/30以下に、濃縮に要するエネルギーは1/10以下に抑えられ濃縮効率が低い。しかし回転胴を超高速で回転させるため装置の製造（回転胴の材料、ベアリングシステム等）および運転操作の面で高い技術が要求される。

遠心分離法が高効率であることは、40年当時理論的に知られていたが、当時の技術では無理であり実用化は困難とされ米国ではほとんど検討されなかった。

戦後技術の発展に伴い、遠心分離の実用化が諸国で開始された。我が国でも原子力発電用のウラン濃縮技術の確立が求められ、59年に理化学研究所が第1号遠心機を試作し、基礎研究が開始された。研究開発は原子燃料公社に引き継がれ、69年に至り始めて小型機による濃縮試験に成功した。現在日本原燃株式会社が六ヶ所村で商業プラントの操業を続けている。

現段階でウラン濃縮に関しては遠心分離が世界の主流となってきた。イランでは7千基の稼働が知られており、また最近（09年4月）新型装置の開発を宣伝している。北朝鮮もパキスタンからの技術導入を図ったとされている。

3. ²³⁹Puの発見

原子番号92のウランよりも重い原子番号94の原子の存在は理論的に予測されていた。41年2月、カルフォルニア大学のグレン・T・シーボーグらのグループは、バークレーの60インチサイクロトロンを用いてウランに重水素を衝突させることにより新しい原子の生成を確認し、冥王星（Pluto）にちなんでプルトニウム、Puと命名した。

さらに、黒鉛ブロックのピイル内でウランに中性子を照射するとプルトニウムが生成されることが分かり、回収した微量の²³⁹Puを用いて検討を重ね、²³⁵Uよりも容易に核分裂する原爆材料として優れたものであることを確認した。41年3月から7月にかけてのことであった。

この発見はOSRDにより取り上げられ（41年6月）、42年6月に発足したマンハッタン計画に組み込まれた。パイロットプラントとして²³⁸Uをプルトニウムに変換するための原子炉とプルトニウム回収のための化学処理施設がオークリッジに建設された。その検討結果を受けて、大量のプルトニウムを作るため大型の生産炉（黒鉛炉）が3基と化学処理工場がワシントン州ハンフォードに建造され、44年9月から45年2月にかけて稼働を始めた。

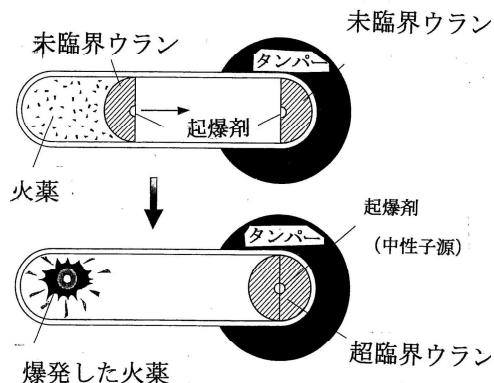
プルトニウムの核分裂を利用した原爆の開発には多くの技術的な難関があった。しかし、その発見からわずか4年後、45年8月原子爆弾として長崎に投下された。なお、プルトニウムを回収するために最初にやむを得ず採用した「リン酸ビスマス法と称する沈殿法」は欠点が多く、戦後オークリッジのパイロット試験を経て、51年に「Redox法」、更に56年に「Purex法」と呼ばれる溶媒抽出法に改良された。現在、この「Purex法」は原子力発電所からの使用済核燃料の再処理法として逐次改良されて世界各国で採用されている。

4. 原子爆弾の構造

広島型と長崎型の構造を概念的に図-1および図-2に夫々示す。主な構成要素は、高濃縮ウラン金属またはプルトニウム金属、中性子を発生する起爆剤（イニシエーター）、発生した中性子を反射させる金属ウラン製のタンパー、火薬と信管そして鋼鉄製格納容器である。

a. 広島型

広島型では ^{235}U を90%以上含む高濃縮ウランの金属塊2個を円筒型の容器内に予め決められた距離に離して設置する。これらの金属塊は ^{235}U が中性子を捕獲して核分裂を起こしても反応が局所で止まってしまう量、つまり臨界量以下になるよう、夫々に形状と質量が設計されている。



第1図 広島型原爆の概念図

(山田克哉、核兵器の仕組みより)

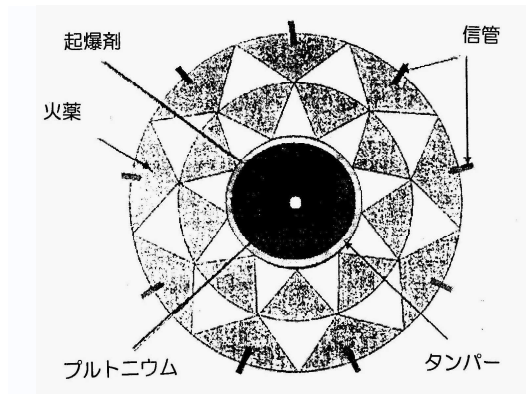
火薬を爆発させてウラン金属塊をもう一つのウラン金属塊に衝突させ大きな塊に一体化し超臨界状態とする。その瞬間起爆剤で発生した中性子が注入されて核分裂が始まり、中性子の数が急速に増すとともに核分裂も急速に増加（連鎖反応）、瞬時に大量のエネルギーを放出し、大爆発が起こるのである。この間数百万分の1秒以下と言

われている。発生した中性子を反射し有効に利用するためと、併せて機械強度を増すために金属ウランのタンパーが濃縮ウラン金属を囲んでいる。この構造は比較的簡単であり、容器の形状が細長く砲身に似ているためガンバレル（砲身）型と言われている。

広島に投下された通称Little Boyは、直径0.6m、長さ3m、4トン、90%以上の濃縮ウラン62kgを装填していた。核分裂量は0.6kg（約1%）、TNT換算13キロトンと言われている。（前号で記述した核分裂量6kg（約10%）は訂正する）。

b. 長崎型

長崎型では、兵器級プルトニウム（ ^{239}Pu 92%以上+ ^{240}Pu 7%以下）を図-2に示したように球形の容器内に完全な球の形で格納し、球体のプルトニウムの中心には爆発時に中性子を放出する起爆剤が挿入されている。球体のプルトニウムの周囲は金属ウランのタンパーにより囲まれており、その外側には高度の技術で設計された形状と位置に火薬が区別されて配置されている。この大量の火薬を爆発させ、発生する衝撃波によりプルトニウムの塊を同時に均一に中心に向けて圧縮し密度を高めて「超臨界状態」とし、それと共に大量の中性子を起爆剤から送りこみ、核分裂を起こさせるのである。このように球状の核分裂性物質を中心に向かって押しつぶす方式を「インプロージョン」（爆縮）と言っている。この方式では3次元的な衝撃波を利用するため、使用する核分裂物質の量が少なく済み、ガンバレル方式より効率を高めることもできる特徴がある。しかし設計製作そして操作に高い技術力が要求される難点がある。



図一2 長崎型原爆概念図

c. 起爆剤

^{235}U や ^{239}Pu が核爆発を起こすためには引き金となる中性子を必要とする。臨界量を越せば微量の中性子により核爆発は起こり得るが、局所的な爆発となるため材料が飛散して有効な爆発とはならない。極めて短時間（数百万分の1秒以下）、瞬間的に爆発させる必要がある。起爆剤は爆発に際し大量の中性子を発生して核分裂反応を加速し瞬間的にかつ確実に爆発させる目的で挿入されており、ポロニウムをアルミ箔で包み、周りをベリリウムで囲む構造となっている。ポロニウムから放出される α 粒子（ヘリウム原子核：陽子2個＋中性子2個）がベリリウム核に吸収捕獲され、大量の中性子が放出される。 α 粒子はアルミ箔を透過しない。爆発の瞬間アルミ箔は破れ、ベリリウムから中性子が放出される。

このような起爆剤を用いても、実際に核爆発を起こした核分裂量は、広島型で1%、長崎型で20%に過ぎなかった。

d. インプローション方式の特徴

核爆弾材料としてウランと比べるとプルトニウムには次の利点が見られる。

① 黒鉛炉内で ^{238}U に中性子を照射するとプルトニウムが生成され、化学的操作で抽出が可能となる。プルトニウムの入手は膨大な費用がかかる濃縮工程を必要とせず、

比較的容易である。

② 1回の分裂で放出される中性子の数がウラン（平均2.5）より多く（平均2.9）、臨界量が少ない特徴がある。このため核爆弾として小型化が可能である。

③ 同じ理由でウラン爆弾より威力が大きい。

一方で、プルトニウム爆弾は、構造が比較的簡単なガンバレル方式を採用できず、高度な技術を必要とするインプローション方式を採用せざるを得ない欠点がある。 ^{240}Pu の混在がその原因である。

原子炉内で ^{238}U から生じた ^{239}Pu はそのまま中性子を捕獲して ^{240}Pu になる場合がある。 ^{240}Pu は自発核分裂を起こし易く、その際中性子を放出する。このような性質をもつ ^{240}Pu を含むプルトニウムをガンバレル型に利用した場合、分離して置かれた2個の金属塊が合体する一瞬前に、 ^{240}Pu から放出される中性子により超臨界状態になり局所的な爆発（早期爆発）を起こしてしまう。つまり全体としての斉一な爆発とならない。プルトニウムはガンバレル方式に不適當である。

インプローション方式では、臨界未満の状態から超臨界状態になり爆発するまでに要する時間が、ガンバレル方式に比べ非常に短いのである。火薬の爆発によりプルトニウム球が圧縮されて超臨界状態になった瞬間、中心に置かれた起爆剤が壊れて放出された中性子が全体の連鎖反応を起こし、全体を斉一に爆発させる。 ^{240}Pu から放出される中性子が作用する前に爆発するように工夫されたのである。ただし、繰り返しになるが完全な球体を保ちながら圧縮するためには、火薬の配置を含めて極めて高度な技術が必要である。

マンハッタン計画の最終段階において、構造が複雑なインプローション型原爆が計画通り爆発するか実証する必要に迫られ

た。莫大な費用を投じて作られた2発の爆弾のうち1発を用いて45年7月16日ニューメキシコ州アラモゴルド砂漠で人類最初の核実験（トリニティ実験）が行なわれた。実験は成功し、残りの1発が長崎に投下された。

プルトニウムはガンバレ方式には利用できないが、 ^{235}U はインプローション方式でも利用は可能である。現在ではウラン爆弾はこの方式になっているようである。

インプローション方式では、臨界量以下のウランあるいはプルトニウムがその量を保ったまま超臨界状態となり爆発する。従って、小型化が可能となる特徴がある。例えば、核分裂し易く臨界量が小さい特性があるプルトニウムを用いて、直径15cm、長さ57cm、全重量70kg、TNT換算1～10kトンの性能を持つカノン砲（155mm）の砲弾が既に20年ほど前に開発されたと言われている。また最新技術では一人の人間が持ち上げられる程度に小型化された核兵器が開発されたとの報道もある。テロ集団への拡散の恐れが指摘されており、厳重な管理が求められている。（続）

平成22年4月号 秩父107号

日本の原爆開発を回顧する (Ⅲ) — 温故知新 —

岡本祥一 予科5-7
(川口市) 航空16-4

第4部 日本における原爆

I 原爆研究事始め

安田中将^{註-1}は、我が国で早期に原爆開発を指示した軍人として知られる。ハーンの分裂発見（39年）後の早い段階から

原子核物理の重要性を認識し、検討を開始していた^{註-2}。

1940年春、安田は着任早々の鈴木辰三郎大尉^{註-3}に核分裂を軍事利用する可能性について調査を命じた。命を受けて東京大学理学部嵯峨根教授および仁科芳雄の指導を受け、同年10月頃20頁程の簡単な報告書を提出した。内容は「原子爆弾は出現する可能性がある。原爆の材料となるウランウムの鉱石は、我が国にも埋蔵されている可能性がある。」というものであった。

この報告は秘密扱いではなく広範囲に配布された。日本における原爆開発の事始めと指摘出来よう。米国の「ウラン諮問委員会」設置が39年中頃であるから、かなり早い時期での着手である。

鈴木^{註-3}の報告を受けて、安田は1941年4月、正式に理研所長大河内正敏に「ウラン核分裂の軍事利用調査」を依頼した。

大河内所長は、調査責任者として仁科を選任、玉木英彦氏（後に東大教授）を情報分析担当とした。取りあえずの費用として当時の20万円が軍から支出された。1942年末に提出された調査結果には「核分裂計算結果は核兵器出現の可能性が相当あり」「100%の ^{235}U を1kgあるいは10%の ^{235}U を10kg造ると黄色火薬1万8千トンに相当する爆弾が出る」と記されている^{註-4}。

註-1 当時陸軍航空技術研究所所長。陸士31期。軍派遣学生として東京大学電気工学科で優れた成績を残して卒業しており、卒業に当たり大学に残るよう強く勧められた程の俊才といわれている。（1889—64）

註-2 次のような記録がある（昭和史の天皇、原爆投下、読売新聞社編）。「安田中将はその当時（1939年後半）原子物理学のメッカであった理化学研究所の仁科博士はじめ仁科研の若手を航空技研に呼

び、原子物理学概論等を講演してもらっていた。原爆は将来実現する、若手の軍人に基礎知識を与えておきたいとの考えであった。」

註一三 鈴木（陸士45期、後にいわき明星大学学長）は軍の派遣学生として東京大理学部西川教授の指導を受け、卒業して航空技研に配属されたばかりであった。金属材料が専門であった。（1912—2001）

註一四 この計算値はオットー・フリッシュの値と一致している。

付記 仁科は当初原子爆弾の開発に積極的でなかった。中根良平氏^{註一五}は、「1941年の春、当時の理研大河内所長を通じて仁科先生に軍から原爆開発の依頼があったが、最初は拒否された」と述べておられる（理研OB会会報、1903年4月）。当時仁科は自身で設計した6インチ大型サイクロトロン^{註一六}の建設に全力を注いでおり、自分が責任を負わされる可能性が高い大規模プロジェクトを積極的に進言するとは考えにくい。

また1940年の段階で「仁科博士が安田中将にウラン爆弾を進言したといわれる」との記述が多く見られるが、以上のことから疑わしい。安田中将独自の判断があったと推察する。

註一五 中根氏は当時技術中尉として仁科研に所属、原爆開発に直接関与された。後は理研の主任研究員としてまた副理事長として活躍、我が国の原子力事業の発展に貢献され、現在も後輩の指導に当たっておられる。

Ⅱ 二号研究

1. 概要

仁科から提出された報告に基づき、安田は航空本部直轄のプロジェクトとして「軍

機密二号研究」を開始することにした。1943年初頭東条首相直々の命が下り、ウラン濃縮の研究が理研において仁科の主導で開始されることとなった。

「二号研究」特別研究班編成表によると布陣は次のようであった。（日本科学史学会編：日本科学技術史大系、13巻、465頁）

UF₆の製造：主任 木越邦彦、他5名
分離装置設計と基礎計算：主任 玉木英彦、他1名

熱拡散分離塔の建設および²³⁸Uと

²³⁵Uの分離：主任 竹内 証、他4名

ウラン資源探索およびウラン精製：主

任、飯盛里安、他3名

分離度の測定：主任 仁科芳雄、他4名

この編成表には大阪分室設置の記入がある。分室の分離研究班は鈴木、検出研究班は大阪大学浅田教授が主任となっている。

当時考えられていた原爆の構造は容器の中に10%濃縮ウラン10kgを入れ、その中に水を注入することで超臨界状態にし爆発させようとするもので、いわば暴走する軽水炉のようなものであった。核反応を瞬間的かつ斉一に爆発に導くため中性子を発生する起爆剤を利用する発想は見当たらない。「二号研究」に従事した人員は約20名程度（補助人員を含まず）、実働した熱拡散分離塔は1基（当初3基を予定）。経費総計約2百万円（換算数十億円と言われる）の証言がある（昭和史の天皇、原子爆弾、32頁）。

付記 当初原爆開発に積極的でなかった仁科は、以下の二つの理由で研究を受託することにしたといわれている。一つは原子核関連の研究に携わっている多くの若者を兵の義務から守ることが出来ること、そして巨額の開発費の一部を原爆開発の名目でサイクロトロンの建設に振り向け、原子核物理

の基礎研究に役立たせようと考えたことである。原爆開発費のサイクロトロン建設への振り向けは、戦後かなり経過して当時の記録が発見されて初めて明らかになったという経緯がある。

仁科はその当時すでに、原子力エネルギーの平和利用を考えていた。二号研究を引き受ける際、核分裂反応は原爆にも発展するしエネルギー源にもなる、どちらの開発が先になるか分からぬと言われ、担当の軍人もどちらでも良いと答えている。そして「とにかく核分裂すると非常に大きいエネルギーが出るから、爆弾にしないで、熱源と言うか動力源として使うのが一番よいのだがとの意見を周囲の人たちに再三漏らしていた。(中根良平 理研OB会報55号、1902年10月)。

2. ウラン濃縮

^{235}U の濃縮分離にはガス拡散法、電磁分離法、遠心分離法も検討されたが、最も費用がかからず、簡略な手段としてガス熱散分離法を採用することとし(1943年3月)、装置の設計、製作を開始した。

ガス熱拡散分離の責任者に任命された竹内(蔵前高等工業(後の東工大)応用化学、後に横浜国大教授)の苦闘が始まる。それまでは仁科の指導のもとで宇宙線研究を続けていた。竹内にとっては、装置の設計、製作についての技術的知識はほとんど無い状況からの出発であった。試作室は、当時駒込上富士前にあった理研敷地(現「文京グリーンコート」、小石川高校グラウンドの東隣)の49号館(木造2階建て、現アイソトープ協会に隣接した区域にあった)に置かれた。

苦闘の経過は戦後竹内自身が記した、49号館に因んでの「始終苦号館の記」、そして「二号研究ノート」に詳しい(日本科学技術史体系、13巻、444~465)。

竹内により設計されたガス熱拡散分離装置の概要は、同心的に配置された長さ約5mの内管(直径50mm)と外管から構成されており、内管と外管との隙間は2mmと設計された。内管をヒーターで加熱、外管を水で冷却して2mmの隙間に温度差を作り、そこに分離する同位体のガスを送り込む。軽い成分は高温の内管の壁に沿って少し早く上昇し、少し濃縮されて上のガス溜に集められる。この操作を繰り返す。アルゴン等の同位体分離には確立されていた方式である。

この方式を腐食性の強いフッ化ウランガスに適用し、 $^{238}\text{UF}_6$ と $^{235}\text{UF}_6$ とを分離しようとした。

パイプの材質は純銅が選ばれた。腐食防止のため金メッキ、プラチナメッキも考えたようであるが、ゆとりは無く実行されなかった。

その頃戦況は既に悪化し始めていた。1943年2月にはガダルカナル撤退、4月には山元帥戦死、5月にはアッツ島玉砕、9月にはイタリア降伏と続いた。当然資材の入手は困難を極めた。竹内ら研究者自ら、軍の関係者と折衝し、配給切符を手配し、業者を探し依頼する等の雑用をこなす必要があり、研究は遅れがちであった^{註-6}。

やっと資材を確保し、49号館の二階の床を一部切り取って1943年10月に分離塔のみ立てが開始された。

人手不足に悩みながら悪戦苦闘の末、試作第1号塔の真空テストに成功したのは1944年3月に入ってからであった。その頃木越らの UF_6 の製造もうまくいって実験が本格的に進み始めた^{註-7}。

予備テストを重ねて、実稼働に入っただのは1944年7月であった。その後半年にわたり第1次~第6次の分離操作が行われた。

分離試料の分析は1945年2~3月、

理研のサイクロトロンを用いた放射化法により山崎文男（後に理研、主任研究員）担当でおこなわれた。試料のUF₆を分析可能な酸化ウランに変換する化学操作は中根氏が担当した。結果は分離操作前後の差異は見られず、不成功と結論された。

このような経過をたどるうち、1945年4月13日理研の大部分は空襲により焼失、木造の49号館も焼け落ち、「二号研究」は事実上消滅した。

註一6 竹内の日誌のごく一部を転記する。

竹内：「純銅のパイプが欲しい」

軍 「理研側で出来るだけ手当してくれ。やむを得ないものだけ航空本部が業者に頼んでやる。」

竹内：「資材の運搬はどのようにするのか」

軍 「それも理研でやってくれ。証明書は発行するから理研で手当てしろ。」

註一7 フッ化ウランの製造については本人の述懐に詳しく述べられている。（昭和史の天皇、原爆投下、115頁）

（続；次号は東京の理研の爆撃被害を予想して、ガス熱拡散分離装置の開発研究は大阪大学理学部内に併設した「3. 大阪分室」の話から始める。）

平成22年7月号 秩父108号

日本の原爆開発を回顧する (IV) — 温故知新 —

岡本祥一 予科5-7
(川口市) 航空16-4

第4部 日本における原爆 開発の経緯

I 原爆研究事始め

II 二号研究

1. 概要

2. ウラン濃縮

(以上秩父107号掲載)

3. 大阪分室

1944（昭和19年）年3月、鈴木は安田より「二号研究を推進せよ」との命を受け、理研に出向き直接分離の仕事に従事することとなった。

半年前に開始された分離塔の組み立ては、分離塔1本だけで、しかも真空漏れなどの故障が多く、進みが遅かった。このような状況を打開するため、また撃墜したB29が持っていた地図に理研が重要な爆撃目標として示されていることが分かったため、航空本部からの勧告を受け、大阪大学理学部の菊池正士教授（後に日本原子力研究所理事長）の了解を得て、ガス熱拡散分離塔を作ることとなった（1944年末）。

鈴木は一部に改良を加えた分離塔を自ら設計し、住友金属に製造を依頼した。理学部の建物の一部を1階から3階まで打ち抜いて3本を設置、理研での竹内の実験の成功があれば直ちに稼働できるように準備した。

しかし1945年3月12日の大空襲で電気と水道の供給が止まり、実験は困難となった。とはいえ、装置の操作を担当していた尾崎誠之助（後の大阪市大教授）らは装置をなんとか稼働させ、アルゴン等の同位体分離の実験は続けていた。だが、分離すべきUF₆は終戦直前にやっと到着したとのことで、実験操作は行われなかった。

終戦直後、3本の分離塔は関係者の手で近くの土佐堀川に投げ込まれた。

1945年4月には理研でも、阪大でも分離濃縮の仕事は絶望的な状況に追い入れ

ていた。しかし鈴木はあきらめなかった。尼崎の住友金属鋼管に命じて、自身で設計した改良型の分離塔5本を工場内に設置した。材料は入手しやすく、また現場仕事が不得手の学者と異なり工員の手で工事はすばやく進み、1945年5月には完工を見た。しかし原料のUF₆がついに到着せず稼働しなかった。

折角の分離塔は終戦直後中根氏らの手により、近くの川に投げ込まれた。

空爆の頻度が増し、鈴木は住友の工場も危険と思い、ひそかに妻の実家（三重県名張）にも分離塔設置を考え、家屋の改造を図るなど設置の準備に取り掛かっていた。しかし終戦を迎え、鈴木の本身の努力は水泡に帰したのである。

国のためなんとしてでも「ウラン爆弾」を作らねばならないと思い定め、実現に努力した鈴木の本心と執念に、心からの敬服の念を禁じ得ない。

4. 熱拡散分離法失敗の原因

中根氏によれば、失敗の原因はUF₆が分離塔の銅と反応し固化したためである。この見解を裏付ける記述が竹内の実験日誌にある。

① UF₆ガスを注入し始めると予定の体積以上にどんどん入った。（この段階で腐食反応が進んだと判断される。）

② 分離塔のガス溜に銅の腐食生成物と思われる物質が大量にあった。結局フッ化ウランガスの強い腐食作用を防ぐ対策に欠けていたことが不成功の大きな要因であろう。

米国においても当時熱拡散分離法によるウラン濃縮分離が検討されていた。気体ではなく液体のUF₆を使用した。分離塔は理研で採用したものとほぼ同様で、同心的に配置された内管・外管から成り、内管を熱水蒸気で加熱、外管を水で冷却して温度差

を作り、この隙間にUF₆の液体を流して少しだけ軽い²³⁵UF₆が筒の中の隙間を早く上昇することを利用して分離しようとする方式であった。内管にはニッケルメッキ管、外管は銅管、冷却水管には鋼管を使用した。分離効率を良くするために高さ約15mの分離塔を設計し、約2100本を製造、設置した。運転の結果、莫大な熱エネルギーを消費し、極めて非効率であるとの理由で1945年前半に中止された。

熱拡散分離方式は濃縮ウランの入手方法としては不適當であり、理研の方式がたとえ順調に推移しても、実用的ではなかったことになる^{註8}。

それにしても分離塔1本対2100本という比較のしようがない日米間の工業力の差に驚かざるを得ない。

「二号研究」に従事された中根氏の言葉を付け加える。

「私たち「二号研究」のメンバーは、誰も原爆が出来るとは思っていませんでした。必要な量の²³⁵Uをガス熱拡散分離法で造ることは（たった1本の分離塔では）不可能だとわかっていました。米国があんに短時間で原爆を完成させるとは思ってもみませんでした。私たちはあくまでも基礎研究のつもりでした。」（理研ニュース1906年4月）

【註8】当時武谷三男（後に立教大学教授11—2000）は仁科研に所属し、朝永振一郎（後に東京教育大学教授、06—79）の指示により福田信之（後に東京教育大教授、21—94）と共にガス熱拡散分離方式の理論計算を行っていた。しかし、京都大学の学生時代に左翼思想の研究をしていたとの理由で、特高ににらまれ、1944年5月以降約4ヵ月間留置場での生活を余儀なくされていた。劣悪な生活環境の中で、正確な理論計算を行い、最初は適當と考えていたガス熱

拡散分離法は採用すべきでない、遠心分離法も検討すべきとの結論に達した。この結論を仁科に報告したが、既に実験が進められており採用されなかった。「紙と鉛筆ではアメリカには負けていなかった」と云えよう。

付記 朝永は当時仁科研理論グループの責任者であった。中根氏は次のように述べている。

「朝永先生が「二号研究」での同僚たちの苦勞を見かねて、ある日仁科先生の所に行って、“ウラン濃縮の理論計算のお手伝いをしましょうか”と申し出られた。すると“お前のようなものは勝手に勉強しておれ”と追い返してしまわれた。基礎研究は最も大切であるというのが仁科先生の信念であった。」（中根良平、蟻塔、1986年3月、共立出版）。

このような経緯で朝永は直接「二号研究」に関与していない。しかし矢張り気になったと思われ、武谷に熱拡散の理論計算を指示していた。

5 ウランの入手

原爆に必要な²³⁵Uは、ウラン金属中に0.7%しか含まれていない。100%の²³⁵Uを1kg入手するためにはウラン金属約143kgが必要な計算となる。

当時国内ではウラン鉱は殆んど無く、責任者の飯盛里安（後に理研主任研究員1885－82）は朝鮮、満洲そして東南アジア占領地区に探査の手を伸ばした。採掘した原鉱を東京の荒川地区に設置した工場に集めウランを抽出、精錬した。

①朝鮮半島で産出するブラックサンドに0.3～0.5%のウランが含まれていた。
②マレー半島で錫とチタンを抽出した残渣にUが少量含まれていることが分かり、約4,500トンを入力、そのうちの半分が荒川工場に運ばれた。

③含量の少ないウラン鉱が福島県石川町で僅かに産出した。鉱石搬出に地元の石川中学の生徒がモッコを担いで動員されていたという。

④1945年5月の大空襲で荒川工場は焼失しウラン精製は中断された。ある程度の設備は石川町への疎開が進んでいたが再開されず終戦を迎えた。

⑤ウラン入手の責任者であった飯盛によれば航空本部に提出したのは数kgではなかったかという。僅かな量しか生産されなかったことになる。（飯盛里安、Researcher, No.14, 1970年, 11月号）

付記 軍部は当時の同盟国であった降伏寸前のドイツにウランの提供を依頼した。1945年3月24日Uボート234号は機密物質を乗せてキール軍港を出港する。しかし、直後の5月7日ドイツは全面降伏、Uボートも米軍に降伏、ポーツマス軍港に抑留された。同艦には“FOR JAP ARMY”と記された酸化ウラン560 kgが搭載されていた。

同艦にはメッサーシュミットの設計図200項目に及ぶ軍事物質も搭載されていた。また特命を帯びた日本海軍技術中佐2名が同乗していた。米軍への降伏に当たり自決されている。（理研八十八年史、229頁）

6. 「二号研究」の結末

①1945年4月、熱拡散分離塔が設置されていた49号館が焼け落ちた。

②1945年5月ウラン精製の荒川工場焼失。

③大阪分室も機能せず。

④「二号研究」を発案し推進した安田は、1944年3月に航空総監兼航空本部長の職を解かれ多摩技術研究所長に転出していた。「特攻」に強く反対し、左遷されたとも言われている。

⑤仁科は再起を試みたが、1945年6月困難と判断、軍に通告した。

以上の経過から1945年7月、軍は「二

号研究」の打ち切りを決定した。

付記 海軍では艦政本部が窓口となって1943年5月京都大学荒勝教授に原爆開発「F号研究」を依頼した。それ以前にも海軍技術研究所を中心に仁科らを招いて原爆開発の動きはあったが、電波探知機の開発を優先しており積極的ではなかった。依頼を受けた荒勝は「核物理の基礎研究の一過程」として、 ^{235}U の濃縮に遠心分離法適用の検討を開始した。開発は設計段階で終わった。

あとがき

1945年8月6日、広島に新型爆弾が投下された。「吾々二号研究の関係者は文字通り腹を切る時が来たと思う」。広島惨状を視察して仁科が玉木氏に宛てた手紙（8月7日夜）の冒頭の一節である。原文が理化学研究所（和光市）の仁科資料室に展示されている。

「二号研究」と「マンハッタン計画」を比較して見られる日米間の大きな国力の違いに改めて驚きの念を禁じ得ない。このような事情を当時の指導部はどの程度認識していたのだろうか。

1940年前後を境に、米国からの原子核物理関連の研究発表は全く行われなくなっていた。我が国の科学者は当然その事に気づいていた。しかし、米国で原爆開発が強力に進められているとの情報には結びつかなかった。またプルトニウムの発見そして原爆利用についての情報は全く入らなかった。

対照的にスターリンはマンハッタン計画の機密情報入手に成功していた。そしらぬ態度でヤルタ会談（1945年2月）に臨んだ話は有名である。

大鷹節子氏^{註9}は、その著作「戦争回避の英知」（朝日新聞社出版）に、当時の指導部が世界情勢についての情報を軽視し、あ

るいは無視した多くの例について述べておられる。

敵を知り己を知る方策が立てられなかったものか。

翻って現時点での国力の差異はどうか。科学力の一つの指標として、自然科学分野におけるノーベル賞受賞者の数に着目した。結果を第1表に示す。2008年現在米国は実に227名、我が国は12名で先進国の中でも最低である。

第1表
ノーベル賞受賞者の国別ランキング

国	受賞者数
米国	227
英国	75
ドイツ	68
フランス	29
スウェーデン	16
スイス	15
オランダ	13
ロシア	13
日本	12

我が国の経済力の源泉は技術力と指摘できよう。技術は基礎科学の知識そして工業人の努力を総合した成果である。技術立国を国是とする我が国において基礎科学が重視される所以である。

20世紀の世界のあり方を変えた原子エネルギー開発は基礎科学の知識の累積の上での成果であった。今世紀の世界のあり方を変える新技術開発はどの方向に向くのであろうか。我が国の学界、官界、産業界の総力を挙げての取組に大いに期待したい。

【註9】大鷹 正氏（60期、8-6、航空3-2）の夫人。実父の小野寺信大佐は戦時中ヨーロッパ各地の駐在武官であった。

謝辞

本稿を草するに当たり旧友、青地哲男氏（元日本原子力研究所理事、東海研究所所長）に多大の援助を頂き。また妻の敬子にも協力を頂いた。心から感謝申し上げる。