

## 講座

## 原子力の平和的應用

[ 1 ]

阪大理学部 浅田常三郎

## 1) 原子力とは

1942年12月2日シカゴに於ける最初の原子炉が連鎖反応により熱を発生した。次いで1945年7月16日に米国ニューメキシコの沙漠で原爆第一号が爆発し、同年8月日本の広島と長崎に第二、第三号が投下されこれに人類は初めて原子力エネルギーを支配し、開放する事が出来た、と同時に我々は今迄よりもつと強く、大きな良心を必要とする時代に突入した。そこで、今から順次に、その原子力エネルギーの応用について述べてゆきたいと思うが、その前に原子力エネルギーとは何であるかをはつきりさせておかねばならない。

今迄我々が用いて出た燃料即、石炭、石油等から得られるエネルギーは、それ等が酸素と結合する時に出るもので、所謂化学反応に於ける余剰エネルギーであり、それ等は原子核の周囲をまわつて居る核外電子のもつてゐるエネルギーが出るものである。これは原子1ヶ当り多くて数十電子ボルトであり、上記の燃料の分子を形成している原子核は反応の前後で全く変化しない。

これに対し、原子化エネルギーは原子核反応に於ける余剰エネルギーであり、原子核から放出されるものである。例へば最もよく知られているウラニウム(U)から得られる原子力エネルギーは、質量数235のウラニウム( $U^{235}$ )に中性子が衝突し、この $U^{235}$ の原子核が2つに分裂した時に出るもので、色々な形のエネルギーとして総計 $92U^{235}$ 原子1ヶ当り2億電子ボルトが出る。勿論、原子力エネルギー源としては、このウラニウム以外にプルトニウム(Pu)トリウム(Th)或は最近特にやかましく云われて来た水爆の材料のリシウムと水素及び重水素と三重水素等がある。

ここで原子力エネルギーが今迄の燃料と異り注目される原因は、上記の如く原子1ヶ当りから得られるエネルギーが桁違いに大きい事である。即1kgの $U^{235}$ から

出るエネルギーは石炭1700トンに相当し、又広島原爆も僅かに1kgのウラニウムが分裂したにもかゝらずTNT2万トンに等しい爆発力をもつと云うことからわかるであろう。然し、その様な長所に対して次の如き短所があることも知つておかねばならない。それは核反応によつてエネルギーを得る以上は常に、それに伴つて放射線が出る事である。放射線の人体に与える影響はビキニのマグロ事件以来一般に知られ渡つた事であるが、此の放射線が出る為原子力の利用に於て大きな困難が常につきまとう事は避けられない。又核反応の後には所謂原子灰と云う放射性物質が出来る為、それ等の処理が将来は大きな問題となるであろう。とは云つても放射性物質や、核反応の時の放射線ですらその利用方法は勿論ある。これも後に述べるが、少くとも原子力発電に関する限りは放射線の伴う事は非常な短所と云わねばならないだろう。

さて原子力エネルギーの応用について述べる前に原子爆弾について少し説明し、それ等の特徴を理解してをこう。

## 2) 原子爆弾

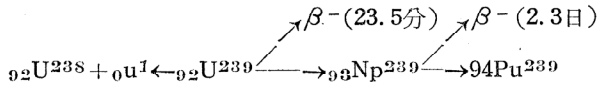
1938年12月にHahnとStrassmannは柏林に於ける実験室でUを中性子で衝撃するとバリウム(Ba)の同位元素が出来るという事を発見した。これが数年後に原爆の完成となつて実を結んだのである。Uの核分裂の発見はいちはやく米国に伝わり、フェルミの予言通り、分裂の際更に中性子が出る事も発見された。Uに中性子をあてると分裂し、それと同時に2個又は3個の中性子と2億電子ボルトのエネルギーを出すという事は、燃焼の現象と同様に連鎖反応の可能性を示すものである。

然しここで最も困難な問題が出て来た、それは上に述べた様に中性子衝撃で分裂するUは天然に産出するU中の1つの同位元素だけである為他のUからそれのみを分離しなければならない事であつた。天然のUには質量か水素の約238倍の $U^{238}$ が99.28%235倍の $U^{235}$ が0.715%そして234倍の $U^{234}$ が0.0058%の割合で含まれてをり、この中で分裂するものは質量235の $U^{235}$ のみで、これを他の同位元素から分離するには化学的方法は全く用いられない。それは同位元素は化学的には全く同じ性質をもつてゐる為である。その為非常にめんどろな方法で分離が行われた。

実際広島に投下された爆弾は $U^{235}$ 1kgが用いられたのであるが、その製作費用は2億ドルも要し、広島が受けた物的損害より遙かに高価であつた。そこで考え出されたのが長崎に投下されたPu爆弾である。このPuという元素は自然界に存在しなかつた元素であるが、 $U^{235}$

## 生産と技術

と同じ性質をもっているので、若しこの元素を人工的につくる事が出来れば原爆が出来るわけである。この Pu をつくる装置が原子炉で、この構造等については後に述べるが、要するにこの原子炉は天然の U 即  $U^{235}$  と  $U^{238}$  の混合物とグラフアイトで出来てをり、 $U^{235}$  が徐々に分裂する様に調節してあり、その時に出る中性子の一部がグラフアイト中で速度を落されてから  $U^{238}$  に衝突する様にしてある。そこで次の様な核反応により  $U^{238}$  が  $Pu^{239}$  に変わつてゆく、



この  $Pu^{239}$  を U から分離するのは、化学的方法が用いられるので  $U^{235}$  の分離に比べて非常に簡単であり安価に出来る。この目的の為に 1945 年に熱出力 70 万 KW の Hanford パイルが 3 台米国の Hanford に建設され後 1949 年に新しく 1 台設置された。長崎に投下された原爆の Pu も此の原子炉で製造されたものである。

原子炉の発明で原爆の材料の問題については解決されたが、次に解決しなければならないのは  $U^{235}$  (或は  $Pu^{239}$ ) の限界質量の問題である。限界質量とは、それ以上の質量の塊にすれば、即座に爆発すると云う限界の質量である。言葉をかえれば、分裂可能な同位元素を或る一定量以上の塊にすれば連鎖反応が起り殆ど全部の  $U^{235}$

(或は  $Pu^{239}$ ) が分裂する量のことである。何故そうなるかといえ、先づ一つの  $U^{235}$  が分裂し中性子が平均 2.3 個出るが、そのうち少くとも 1 個が次の  $U^{235}$  の原子核に衝突しそれを核分裂させねば連鎖反応は成立しない。ところが小さな塊の場合には次の  $U^{235}$  に衝突する前に外部に逃げ出してしまふ。中性子が外へ逃げ出す割合は塊の表面積に比例し、又他の  $U^{235}$  原子核に衝突する率は体積に比例する。表面積は塊の半径の 2 乗に比例し、体積は半径の 3 乗に比例する。それで或る半径以上になると衝突の率が增大して連鎖反応が起るのである。

$U^{235}$  及び  $Pu^{239}$  ではこの限界質量が約 1 kg であることがわかつた。そこでいよいよ原爆が実現可能となつた。即  $U^{235}$  或は  $Pu^{239}$  を 500 瓦づゝの 2 つの半球にしてをき、これを何らかの方法で一つにあわせば爆発するのである。勿論広島や長崎に落された爆弾はその他の附属装置の為に相当大きなものであつたが、結局爆発したのは此の 1 kg の  $U^{235}$  又は  $Pu^{239}$  である。最初の 1 個の分裂を起す中性子は、宇宙によつてつくられる中性子を利用するか、又はラジウムとベリリウムを混じたものから出る中性子を用いている。

以上で広島及長崎型原爆の原理を簡単に説明したので次にそれ等の爆発の状態について述べよう。 $U^{235}$  原子 1 個当り約 2 億電子ボルトのエネルギーが発生しこのエ

ネルギーは次の如き分布をしている。

第 1 表

分裂生成物の運動エネルギー	162 (100 万電子ボルト)
初期 $\gamma$ 線	5
中性子の運動エネルギー	5
分裂生成物の $\gamma$ 崩壊のエネルギー	6
分裂生成物の $\beta$ 崩壊のエネルギー	5
中性子吸収による $\gamma$ 線のエネルギー	~10
総計	~193

この中で分裂生成物の運動エネルギーが温度の上昇に寄与する。

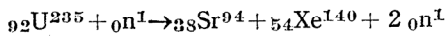
爆発の瞬間には摂氏 100 億度の高温がそのため発生する。実際広島の場合 10 トンの弾体中に  $U^{235}$  が 1 kg 収めてあり、爆発の瞬間に弾体もろとも全部蒸発してしまつた。このガス塊は又非常な高圧の為急激に膨脹し、10000 分の 1 秒後には半径 13 米表面温度 30 万度の火の球になつたのである。この火の球を約 9 km 離れた所から望めば太陽の約 100 倍の輻射を受け、又 3 km の所からでは太陽の約 1000 倍の輻射を受けることになる。この多量の熱のため地上 550 米で爆発した直下では輻射熱により屋根瓦や砂利の表面は熔解し可燃物は即座に発火している。此の様に原爆によつて我々が今迄人工的に作り得た最高温度約 4000 度、又観測出来た最高温度の太陽面の 60000 度と較べ全く想像も出来ない高温が得られた。これが原爆の第一の特徴であつた。では原爆によつて発表する熱量はどのくらいになるであろうか。

こゝで我々はアインシュタインの有名な式  $E=mc^2$  を思い出さなくてはならない。こゝに E はエネルギー、m は質量、c は光の速度である。但し、単位は、瓦、秒 (C. G. S.) を用うる。これは、今仮に 1 瓦の物質を何等かの方法で無くしてしまふことが出来るならば、 $E=1 \times (3 \times 10^{10})^2 = 9 \times 10^{20}$  (エルグ) のエネルギーが発生するという事を示すものである。この 1 瓦の物質を無くしてしまふと云う事が原子爆弾によつて初めてなされたのである。あの 1 kg の  $U^{235}$  が爆発してその質量が約 1 瓦減じた。即約  $9 \times 10^{20}$  エルグのエネルギーが発生したのである。これの 80% が熱エネルギーとして発生し、それは TNT 爆弾約 2 万トン、或は石炭 1700 トンより得られる熱エネルギーと等しいのである。

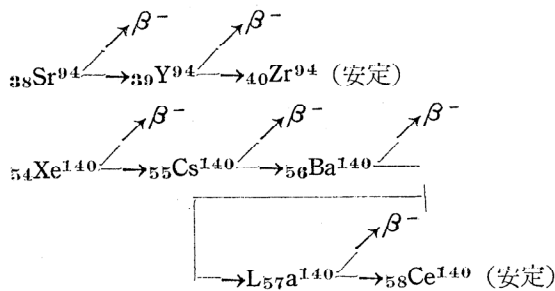
次にあげられる特徴は、原爆爆発に伴う放射線である。この放射線には初期  $\gamma$  線と中性子がある。初期  $\gamma$  線とは  $U^{235}$  或は  $Pu^{239}$  が分裂する際に出る  $\gamma$  線であり、第 1 表に示した様に、原子 1 個当り 500 万電子ボルトのエネルギーが此の  $\gamma$  線として出る。又 6000 万度の様な高温の物体からの放射線は波長が非常に短く  $\gamma$  線の程度の

ものが最も強く輻射される。又中性子に関しては、原爆1ヶが爆発すれば、 $10^{24}$ ヶ以上の中性子が発生し、この中性子は非常に速度の速いものなので、平均自由行程は数百米に達するため爆心附近には強烈なる $\gamma$ 線や中性子が到達する。

原爆による原子病の原因は此等の $\gamma$ 線と中性子の照射によるものであつた。原爆に関し最後に、分裂生成物について述べよう。 $U^{235}$  に中性子が衝突すると例へば

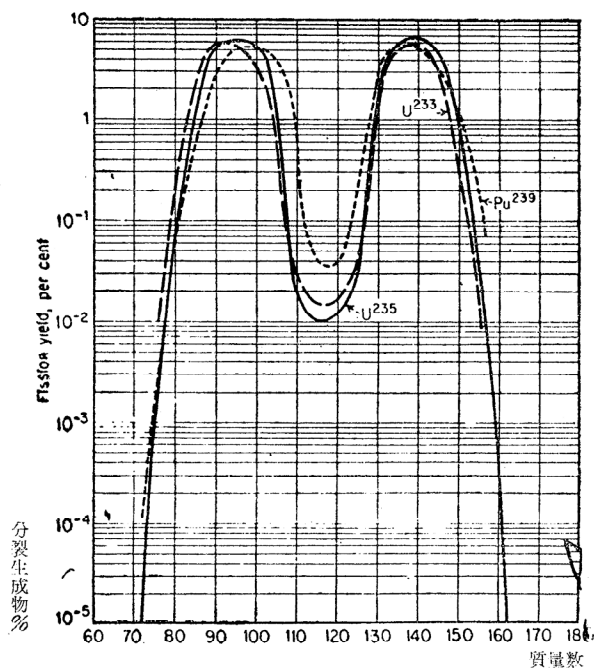


の如く、2つの原子に分裂し、中性子を2ヶ又は3ヶ出す、此の様に分裂して出来たもの即分裂生成物は $U^{235}$ が分裂する場合は、質量数95附近と140附近の元素が最も多く、長崎で爆発した $Pu^{239}$  やソ連で研究されていると云われる $U^{233}$  の場合もよく似た分布であるが、少しづつ異つている。この分布曲線は第1図に示す如くである。又此等分裂生成物は一般に放射性をもっており、上記 ${}_{38}Sr^{94}$  や ${}_{54}Xe^{140}$  の場合は



の如く数段階の崩壊をして安定な元素となる。

この分裂生成物がビキニの灰や放射能雨の正体である。原爆一発によつて約1kgの放射性物質が空中に散布されるのである。この放射能は爆発1分後で $8.2 \times 10^{11}$



第1図 分裂生成物生成率

キュリー ( $\gamma$ 線のみで) の恐るべき量に達する。

以上述べた如く原爆の特徴は次の四つにまとめられる。

- a) 非常な高温度が得られる
- b) 莫大な熱量の発生
- c) 放射線の発生
- d) 分裂生成物即原子灰の生成

此等の性格の応用を順次に項を追つて説明する。

### 3) 原爆爆発時の高温度の応用

前にちよつとふれてをいた様にウラニウム爆弾爆発の瞬間には摂氏 $10^{10}$ 度即100億度の高温が出現し次で $10^{-4}$ 秒後即10000分の1秒後には半径13米表面温度30万度の火の球となる。30万度と文字で書けば致つて簡単であるが、鉄の熔点が約 $1500^\circ C$  白熱電球のフィラメントに用いてあるタングステンでさえ $3400^\circ C$  になれば溶けてしまうのである。又太陽の表面が約 $6000^\circ C$  であり、 $10000^\circ C$  になればあらゆる元素はたちどころに蒸発してしまう。すくなくとも原爆第一号が爆発する迄人間は $6000^\circ C$  以上の温度は見たことがなかつた。勿論理論の上ではいくら高温でも想像はつく。こゝで面白いのは放射の理論である。即ステファン、ボルツマンの法則と呼ばれるもので、“高温の物体の単位面積からの放射量はその物体の絶対温度の4乗に比例する” というものである。

この法則を適用すれば、30万度の火の球の表面からの放射量は太陽のその50の4乗倍即625万倍に達することになる。この結果を用いて前にも述べた如く、その火の球から3km離れた所では太陽の放射の1000倍、9kmの所では100倍を受けることが計算されるのである。実際広島や長崎で木造家屋等が原爆爆発の瞬間に着火し、屋根瓦の表面が溶けてガラス状になつていたのも当然と思われる。然し、此の様な高温が得られても我々はそれを制御する方法を知らない。そこで、この高温は今のところ平和的に利用する手段は無いのである。勿論軍事的には、我々の好まないことではあるが大いに利用されている。それは超重水素爆弾やリシウム爆弾等所謂水爆の点火用としてある。

リシウム ( ${}_{3}Li^7$ ) と水素 ( ${}_{1}H^1$ ) を15万ボルトの加速電圧で衝突させると、核反応が起り、ヘリウム原子2ヶと17.21 MeV (百万電子ボルト) のエネルギーを発生することは1932年にコッククロフトとワルトンによつて発見されてをり、この研究に対しノーベル賞が授与されている。そこで、原爆のまわりをLiHの形の化合物でつゞんでおけば爆発時の $10^{10}$ 度と云う様な高温によりLi及びHは夫々7.5万電子ボルト以上のエネルギーを与えられ、又同時に数千万気圧という高い圧力が加えられる為LiとHの衝突回数が非常に多くなるので、上で述べ

## 生産と技術

た核反応によりヘリウムが出来同時に莫大なエネルギーが原子核から開放されるのである。原子爆弾の場合は限界質量の為或る程度以上大きなものは製作困難であるが、 $\text{LiH}$  は安定な化合物であるから多量に集めても危険はない、従つて水爆は限界質量がなく、いくらでも大きなものが製作可能である、又そのほか、爆弾のまわりを色々な物質で包む事によつて、いくらでも悪質のものが出来るのであるが、こゝでは平和的応用を述べるのが目的であるので、それ等については略すことにする。只現在の段階では未だ、原爆爆発時の高温を支配する手段を我々は持ちあわせていない為これの平和的応用は無くそれ等は将来の問題として残されている。

### 4) 原子核より開放される莫大な熱量の利用

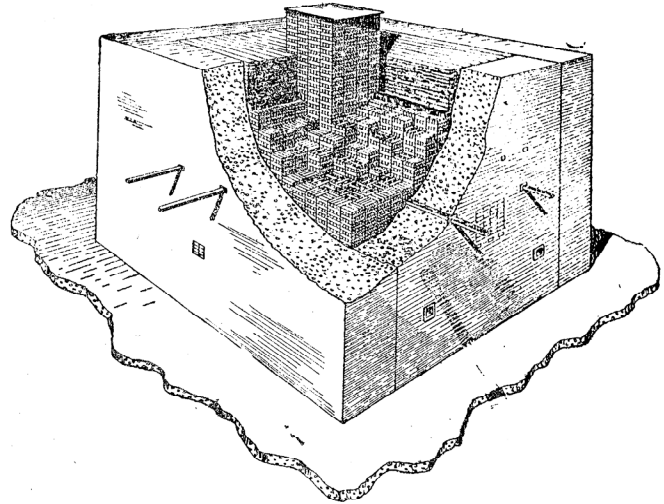
我々は原爆の爆発により如何に莫大な熱量が発生するかを知つた。然し、あの様に瞬間的に発生する熱量は利用出来ない、ところが若しそれだけの熱量を徐々に発生させる事さえ出来たならば我々はこゝに石油、石炭にかわる新たな燃料を発見したことになる。例へばダイナマイトで風呂を沸す事は無理の様に思える、そのまゝでは勿論風呂は吹き飛んでしまうだろう。然し小さな仁丹粒程のダイナマイトを次から次に点火してゆけば風呂は破壊されることなしにその熱で沸すことが出来るであろう。

これと同じ事は  $\text{U}^{235}$  の場合にも云へるのであつて、それは原子炉の発明により可能となつた。然し原子炉は初めから上記の様な目的の為に建設されたものではなく、 $\text{U}^{235}$  を用いた広島型原爆の製作費があまりに高価であつた為、化学的に純粋に分離出来る  $\text{Pu}^{239}$  を大量に生産する為に考え出されたもので、これは此の間死去したエンリコ・フェルミの考案になるものであつた。

即  $\text{U}^{235}$  に中性子を衝突させると2億電子ボルトのエネルギーと平均2.3ヶの中性子が出る、 $\text{U}^{238}$  は高速度の中性子は吸収しないが低速度の中性子を吸収する。そこで、 $\text{U}^{235}$  の分裂に伴つて生ずる高速度の中性子をグラフアイト或は重水（これ等をモデレーターと称する）中でその速度を落とし、そのうち  $\text{U}^{238}$  に衝突させると2段階の核反応を経て  $\text{Pu}^{239}$  が出来ると云う事である。

こゝで原子炉の構造を紹介しよう。先づ一番初めに建設されたのはシカゴの大学内の CP-1 と云う原子炉で、これは1942年12月2日に運転され、熱出力 $\frac{1}{2}$ ワットが出た、これは人力で原子力が開放出来た最初のものでありこの日を“第二の火の発見の日”と称している。10日後にこの原子炉は計画されていた形にまで完成し熱出力 200

ワットになつた。然しこの原子炉は放射線の防御装置が不完全であつたので、まもなく解体され次で CP-1 と同じ型で防御装置を完全にした CP-2 原子炉がシカゴ郊外アルゴンヌ国立研究所に出来た。CP-2 原子炉は第2図



第2図 アルゴンヌCP-2原子炉

の如きもので、中心部は多数の  $4\frac{1}{8}'' \times 4\frac{1}{8}'' \times 16\frac{1}{2}''$  の直方体のグラフアイト、ブロックとこれと同じものに  $8\frac{3}{4}''$  の間隔をおいて2ヶの穴があけてあり、その中に径  $2\frac{1}{4}''$  の円筒状のウランウム或いは酸化ウランウムの6lbをつめたものを交互につみかさねてある。ウランウム或は酸化ウランウムを詰めたグラフアイトブロックを“live”と称し、詰めてないものを“dead”と呼んでいる。このブロックを50段積み重ねた時連鎖反応が始まり $\frac{1}{2}$ ワットの熱を発生した。

このグラフアイトブロックの上には中性子を反射させる為に“dead”のみを4段積み、その上に $\gamma$ 線を通さぬために6'の鉛と中性子を防ぐため4'の材木が置かれてある。側面は12'以上“dead”でかこみ、その外側は5'の厚さのコンクリートの壁でかこんである。これ等をあわせてこの原子炉は横巾30' 奥行32' 高さ21' で全重量は1400トンである。又充填されたウランウムは3200ヶ酸化ウランウムは14,500ヶでこれはウランウム52トンに当る。又使用したグラフアイトは472トンとなつた。3200ヶの金属ウランウムは原子炉の中心部に、14,500ヶの酸化ウランウムを入れたブロックはそのまわりにつみかさねてある。

この原子炉は冷却装置がついていない為熱出力をあまりあげることは出来ないが短時間では200KW、常時では200Wの出力で動作出来た。この火炉には5本の制御棒がついてをり、それは17'の長さの青銅板にカドミウムをはりつけたもので、その中3本は何か事が起つた時炉の運転を自働的に停止する様に100lbの重錘がつけ

(以下52頁へ続く)