

# ベッケレルの誕生から核兵器の開発まで

米国アーカンソー大学特任名誉教授 黒田和夫\*

## 1. はじめに

今から50年前の1945年夏、アメリカの科学者たちは核兵器を開発し、それまで星の中だけで起こっていると考えられていた大規模の核反応を、はじめて地球上で再現することに成功した。そして20世紀の後半に始まった、核実験からの放射性フォールアウトの研究は、星の中で合成された化学元素から、どのようにして地球や太陽系がつくられたかという、基礎科学の分野における重要な問題の解明に寄与するだけでなく、人工放射能による人類の環境汚染という極めて重要な課題の解決に寄与することが大きいと期待される。

私はこのような考えにもとづいて、長年、人工放射能に関する研究に従事してきたので、放射能の発見者ベッケレルの誕生から、20世紀の中頃における、核兵器の開発にいたるまでの、科学と技術の進歩の跡を、ここに振り返って見ることにする。

## 2. ベッケレルの誕生

1852年12月15日に Antoine Henri Becquerel (1852-1908) が、フランスのパリで生まれた。この年は日本では嘉永5年で、明治天皇 (1852-1912) が京都で誕生された年で、ペリー提督がアメリカ太平洋艦隊を引

き連れ、東京湾に侵航し、『黒船来る』で日本国内が大騒ぎとなった年でもある。

1859年5月15日に Pierre Curie (1859-1906) がフランスのパリで生まれた。その年は日本で安政の大獄の年で、7年後の1866 (慶応2) 年に、スウェーデンの発明家 Alfred Nobel (1833-1896) が、ダイナマイトを発明し、翌年の1867 (慶応3) 年11月7日に、ポーランドのワルソーで、Marie Sklodowska (1867-1934) が生まれた。

同じ年、1867年8月にアメリカ政府は、南北戦争で降伏した南部連邦同盟軍に属していた当時の新鋭巡洋艦『ストーンウォール号』を徳川幕府に売却し、日本側は之を軍艦『吾妻』と改名した。<sup>12)</sup> ストーンウォールは、アメリカの南北戦争で有名な Stonewall Jackson (1824-1863) 将軍の名前であり、『吾妻』は徳川幕府の所在地、武蔵の国の江戸のことである。

アメリカの化学者 William Smith Clark<sup>34)</sup> (1826-1886) は、ドイツのゲッチンゲン大学の Friedrich Wöhler (1800-1882) の研究室に留学し、隕石の研究で博士号をもらって、1852年にアメリカに帰国した。そして1876 (明治9) 年に、メサチューセッツ農科大学の学長となっていたクラークは、日本政府に招聘されて、北海道の札幌に創設された農科大学 (現在の北海道大学) で教鞭を

\*) P. K. Kuroda, 4191 Del Rosa Court, Las Vegas, Nevada 89121, U. S. A.

とり、翌年の1877（明治10）年に帰国する時、見送りに来た学生たちに、馬上から振り返って、『Boys be ambitious！（青年よ大志を抱け！）』という有名な別れの言葉を残した。

日本で誰1人知らぬ者のない位に有名になったクラークは、晩年化学者としては活躍しなかったが、19世紀におけるアメリカの代表的な化学者は、1901（明治34）年度のアメリカ化学会の会長をつとめた、『クラーク数』で知られるFrank Wigglesworth Clarke（1847－1931）で、彼は1873年のPopular Science Monthlyという雑誌の1月号に、『化学元素は星の中で、進化の過程によって、1つの原始的物質から出発して、軽いものから重いものが、次々に出来ていった』という、雄大な構想を発表した。それはロシアのDmitri

Mendelēev（1834－1907）が元素の周期律を発表してから2年後のことであった。

星の中における元素の合成に関するF.W.クラークの仮説<sup>56)</sup>は、1896年に放射能発見となる以前に提出されたため、その実験的証明は、1世紀後の20世紀の後半に持ち越されたのである。

### 3. 放射能の発見

1896（明治29）年にベッケレル<sup>7)</sup>が放射能を発見し、1898（明治31）年にキュリー夫妻<sup>8)</sup>が、ウランの鉱石、ピッチブレンド（ $U_3O_8$ ）の中からポロニウムとラザウムを発見した。

放射能が発見された1896年は、日清戦争（1894－1895）終結の翌年で、陸軍中將乃木希典（1849－1912）は、新しく日本の植民地となった台湾に、総督となって赴任し、一

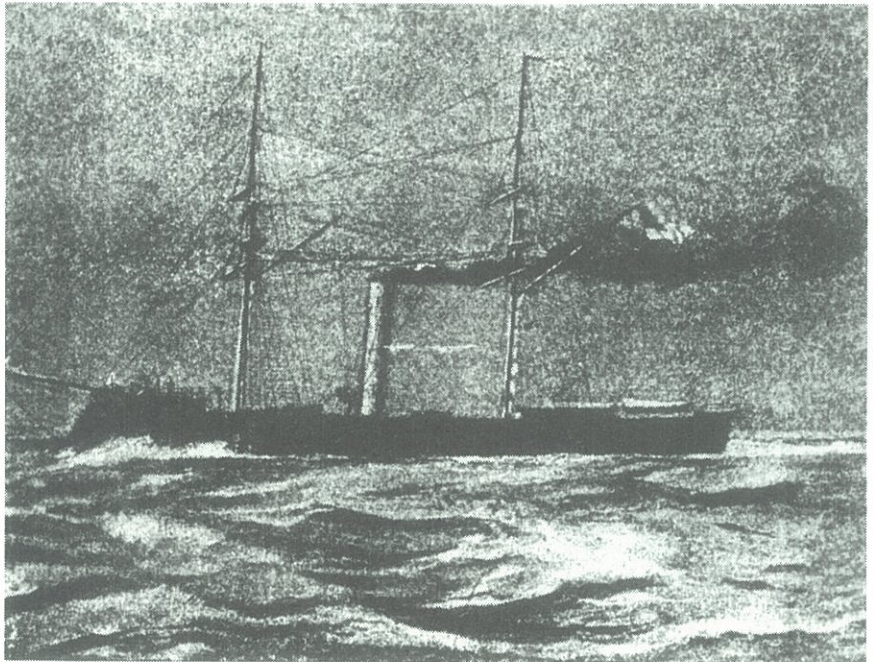


図1 慶応3年にアメリカ政府が徳川幕府に売却した、巡洋艦『ストーンウォール号』

方、海軍少将東郷平八郎（1847－1934）は、海軍大学校の校長に就任している。東郷平八郎はF.W.クラークと同じ年の弘化4年（1847）生まれで、乃木希典は嘉永2年（1849）に江戸の長府毛利候藩邸で生まれている。東郷は16歳の時、文久3年（1863）の、薩英戦争に初陣として参戦し、乃木は17歳の時、慶応2年（1866）の幕長戦争（第2次長州征伐）が初陣であった。

W.S.クラークが日本を訪れた頃（1876－1877）には、東郷平八郎は海軍兵学の勉強のために、7年間（1871－1878）英国に留学中であり、一方乃木希典は熊本鎮台幕僚参謀陸軍中佐で、西南の役に従軍中であつたから、兩人共に、アメリカの教育者W.S.クラークに、『青年よ大志を抱け！』と言われるまでもなく、ゆくゆくは大日本帝国の陸海軍の、トップの指導者になる『大志』を、少年時代から抱いていたのだある。

1867（慶応3）年にアメリカ政府が徳川幕

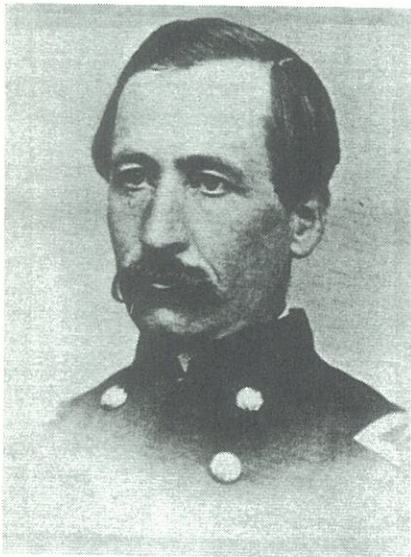


図2 アメリカの南北戦争当時のWilliam Smith Clark（1826－1886）



図3 1905年に東郷元帥と握手するニミッツ海軍少尉候補生（東郷神社権禰宜、氷室千春氏の御厚意による）

府に売却した、軍艦『ストーンウォール号』改め『吾妻』は、日清戦争の後、明治33年（1900）に、フランスのロワール造船所建造の、9,460トン級装甲巡洋艦『吾妻』となつて、明治37、8年（1904－1905）の日露戦争で、日本海々戦において活躍した。

1905（明治38）年に、アメリカのアナポリスの海軍兵学校を卒業したばかりの、海軍少尉候補生Chester William Nimitz（1885－1966）は、アメリカ軍艦『オハイオ号』の乗務員として、生まれてはじめての遠洋航海に出て、日本に到着し、東京湾に停泊中、ロシアを破った日本の将軍や提督たちの凱旋園遊会に招かれ、他の5名の士官たちと共に、旅順で分捕ったシャンパン酒の御馳走になった。

図3に示すのは、その折に東郷提督に会って握手をしているニミッツ少尉候補生の銅像の小さな模型で、東京の山手線原宿駅の近くにある東郷神社の中の展示室に飾られているものである。

ニミッツは40年後の太平洋戦争で、アメリカ太平洋艦隊指令長官として、日本海軍と戦った。彼は東郷元帥を心の師と仰ぎ、日露戦争前後の日本海軍の戦術をつぶさに研究し、それから学び取った教訓を生かして、日本海軍と立ち向かい、勝利を獲得したが、20歳の時に『自分もいつの日にか、東郷元帥のような偉大な軍人になる』という『大志』を抱いたものと思われる。

#### 4. 人工放射能の発見

1934（昭和9）年にフランスの物理学者Frédéric Joliot (1900－1958) と Irene Joliot－Curie (1897－1956)<sup>10)</sup> が人工放射能を発見した。その年、フランスではキュリー夫人が白血病で亡くなり、日本では、前の年の暮れから咽頭癌の疑いで、ラザウム治療を受けていた、東郷元帥が亡くなり、6月5日に国葬が行われた。その時、米国アジア艦隊の旗艦『オーガスタ号』は、アメリカ海軍の儀礼艦として横浜に入港し、ニミッツ艦長は東郷元帥の国葬に参列した。

1937（昭和12）年にイタリアのシシリー島にある、パレルモ大学のペリエールとセグレという、2人の科学者たちが、43番元素（テクネチウム）を発見した。<sup>11)</sup> この元素は天然には存在せぬ、人工的に合成された、いわゆる『人工元素 (artificial element)』の第1号であった。セグレ (Emilio Segré, 1905－1989) はローマ大学の Enrico Fermi, (1901－1954) の一番弟子である。

1938（昭和13）年の暮れに、フェルミ教授がノーベル物理学賞の受賞者となり、1939（昭和14）年の1月に、ドイツのベルリン大学の放射化学者 Otto Hahn (1879－1968)<sup>12)</sup> とその助手の Fritz Strassman (1902－ )

が核分裂を発見した。<sup>13)</sup>

その年の春に大学を卒業した私は、4月から大学院の1年生として、木村健二郎教授の研究室に残ることになり、真っ先に従事したのは、山梨県の増富ラザウム温泉の放射能に関する研究であった。木村教授は、私に増富温泉の放射能を測定させ、当時、柴田雄次教授の副手であった小穴進也氏（今は名古屋大学名誉教授）が比重法によって測定した重水濃度の測定結果と比較するという計画らしかった。

増富におけるこの研究は<sup>13)</sup> は結局、はっきり判らずじまいになったけれども、その年の9月にヨーロッパで第2次世界大戦がはじまり、ドイツ軍が重水資源の確保の目的でノールウェイ進攻作戦を行った頃の話である。私は戦時中、毎年増富に出張し、本谷川の溪流に湧き出す温泉水から、褐色の放射性沈澱物が生成しているのを見て、何となく増富の地下には、天然のウランの核連鎖反応が起こっているのではないかと想像するようになった。

1940（昭和15）年は皇紀2600年で、その記念行事の一つとして、天皇陛下が東大理学部化学教室の木村教授の研究室で行われている研究を視察に見えるということで、研究室総動員で、新潟県瀬波温泉水から微量成分であるセシウムを抽出し、それを材料として東芝に頼んで光電管をつくって、天覧に供するという仕事をやらされた。私はその時、天皇陛下にお目にかかれるものと信じて楽しみにしていたが、当日は研究員一同、助教授以下は出勤する必要なしという命令が出て、大いに失望した。

翌年の1941年12月8日に太平洋戦争がはじまり、私共の研究室は、戦時中数年間、主として日本の温泉から希元素を抽出するとい

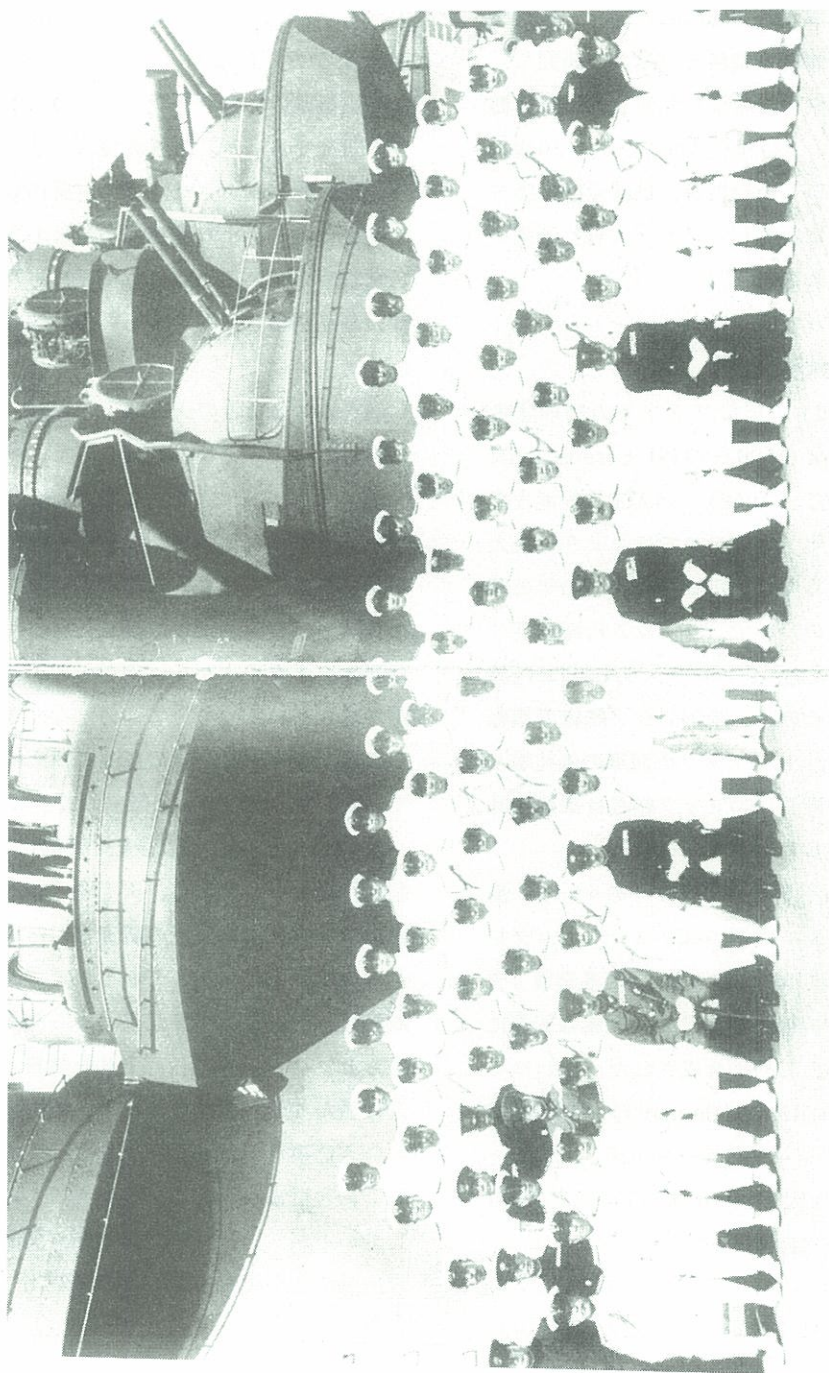


图4 战艦「武蔵」

う、海軍省委託研究をやらされた。

図4に示すのは、その頃の7万トン級の世界最大の戦艦『武蔵』の上甲板における、天皇陛下はじめ日本軍部の指導者たちの記念写真である。日本海々戦当時の9,460トン級の装甲巡洋艦『吾妻』の次の世代の国産の7万トン級の戦艦は、『吾妻』から『武蔵』と名前が改められたものと、私は想像する。

## 5. 実戦における核兵器の使用

広島に原爆が投下された1945年8月6日に、私は委託研究の事務打ち合わせのため、海軍省に出頭したところ、担当の海軍士官に、『温泉から希元素を抽出するというような、つまらぬ研究はすぐに止めて、原子爆弾の作り方に関する文献調査をして、なるべく早く報告書を提出してくれ』と頼まれた。彼は、何10万円かの予算があれば、数ヶ月位で原子爆弾がつかれると、まじめに考えていたらしかった。そこで私は、その日から終戦の日まで、毎日東大の図書館に通って文献をさがしたが、アメリカ政府は『マンハッタン計画』を最高の軍事機密としていたから、東大の図書館に行っても、原子爆弾に関する文献がある筈はなかった。

1週間あまりの文献調査で私が読んだ外国の文献の中で、いくらか役に立つと思ったのは、フルツゲ (Siegfried Flügge) というドイツのベルリン大学の理論物理学者が発表した『原子核のエネルギーを技術的に使用することが出来るであろうか?』と題する1939年の論文<sup>14)</sup>であった。彼はドイツの有名な女流物理学者 Lise Meitner (1878 - 1968) 教授の助手であった。

私がフルツゲの論文を読んで興味深く思ったのは、彼がウランの鉱物であるピッチブ

レンド ( $U_3O_8$ ) の大鉱床の中で、ウランの核連鎖反応が起こった可能性を検討したが、核分裂で発生する、速い中性子の速度を、如何にして熱中性子まで減速するかという問題に引っかかり、天然原子炉が生成した筈であるという、数式的証明に到達するにいたらなかった。

8月14日の夕刻、東大理学部化学教室の私の部屋に、ある人が訪ねて来て、理研で今夜焼却することになっているウランに関する陸軍の機密文書を保管してくれと依頼された。私がそれから半世紀を経過した今日まで、大切に保管している『仁科文書』は横書き10頁の、『ウランニ就テ』と題する、昭和18年(1943)4月付の東二造研究所の書類と、縦書き18頁の『仁科研究室ニ於ケルU研究打合せ事項』と題する、昭和18年(1943)7月6日付、昭和19年(1944)2月2日付、および同年11月17日付の書類で、出席者はいずれも、仁科博士、信氏少将、石田技師となっている。

図5に示す『ウランニ就テ』と題する陸軍の機密文書には、当時、京都大学理学部講師であった、萩原篤太郎博士が昭和16年(1941)5月に海軍で行った、『超爆裂性原子U-235ニ就テ』と題する講演の内容が紹介されていて、その中で同氏が、『若シ万一コノU-235ヲ相当量製造スルコトガ出来、之ト適当濃度ノ水素トノ混合物ノ、或ル適当量ノ大サノ容積ガ実現サル、暁ニハ、U-235ハ有用ナル起爆裂性物質トシテ、其ノ可能性ヲ多分ニ有スルモノト期待セラルル』、という、極めて重大な発言をされたことが記載されている。

之は萩原博士が太平洋戦争直前に考えておられた核兵器は、水素爆弾であったことを示すもので、1986年になって出版されたアメリカの歴史学者リチャード・ローズの『The

第一、中性子が生じ、二次中性子が第一他  
 U<sub>235</sub>作用に連鎖反应的-全U-分裂  
 可能なり  
 是即核燃料として用い  
 たり、但し新燃料、U<sub>235</sub>の爆裂的連鎖分裂  
 はU<sub>235</sub>の濃度が旺盛なり  
 故に爆裂、連鎖反応、応用、存、何れも適  
 当な使用の方法を考案し、若しU<sub>235</sub>の濃  
 度を大規模に製造するに於て、極  
 大の費用を要する事なり  
 又、若しU<sub>235</sub>が相当量製造するに於  
 て、是れを濃縮水素と、混合し、或  
 り、濃縮水素と、混合し、或  
 り、有用な核燃料として共、可  
 用なる多量を有する事期待せら  
 り、又、ウランの核分裂、生成物-混合して  
 之を中性子照射-依り、爆裂-研究  
 又、純化、精製、等-行つて、使せらるる事  
 之、後、核燃料として、使せらるる事  
 不明なり、若し、核燃料として、使せらるる事

図5 『ウラン二就テ』と題する1943年4月付の陸軍の機密文書

Making of the Atomic Bomb』という本<sup>15)</sup>  
 に『……エンリコ・フェルミとエドワード・  
 テラーは、核融合反応を起こすのに、核連鎖  
 反応を使うことを、最初に考案つた人たち  
 ではなかった。その榮譽 (distinction) は日  
 本の物理学者である、京都大学理学部のトク  
 タロウ・ハギワラに属する』と、はっきり書  
 いてある。

一方、理化学研究所の仁科芳雄博士が、戦  
 時中に考えておられた核兵器は、濃縮ウラン  
 と軽水を使った原子炉に似たものであった。

図6に示す昭和18年(1943)7月6日付の文  
 書の第4節『Uヲ爆薬トシテ利用スル際、水ヲ

必要トスル理由』で、仁科博士  
 は、核分裂で生成した速い中性子  
 の速度を、遅い中性子に減速する  
 ために、水分子と衝突させると発  
 言しておられる。しかし、このよ  
 うな仕組みでは、ウランの連鎖反応  
 は起こるけれども、大量の水が必要  
 であって、原子爆弾としては使  
 えない。

しかし、ここで興味あることは、天然ウランの<sup>235</sup>Uの濃度は現在  
 では0.72パーセントであるが、20  
 億年ばかりの昔は、現在の天然ウ  
 ランは、<sup>235</sup>Uの濃度が数パーセント  
 の、いわゆる濃縮ウランであった  
 筈であるから、例えば増富ラヂウ  
 ム温泉の地下に、ウランの大鉱床  
 があったとしたら、ウランの連鎖  
 反応が起こっていたとしても不思議  
 ではない。

第2次大戦中、ヨーロッパの科  
 学者たちは、ウランの連鎖反応を  
 起こすために、中性子の減速用に

重水を使うことを考えていた。

これに対してアメリカのフェルミ教授たち  
 は、グラファイトを使って世界最初の原子炉  
 を建造した。ところが重水は天然に存在する  
 ものではなく、一方グラファイトは天然に産  
 するが、ウランと炭素を含むツコ石  
 (Thucolite) という鉱物は、その大きさが、  
 せいぜい直径数センチ程度しかないから、ウ  
 ランの核分裂によって発生した中性子は鉱物  
 の結晶の外に逃げてしまって、ウランの連鎖  
 反応は起こらない。そのようなことから、  
 ヨーロッパやアメリカの科学者たちは、地球  
 上でウランの核連鎖反応が起こるようなこと

は、現在においても、過去においてもなかったと考えていた。

一方、私は1938年から1945年までの7年間、主として温泉水から希元素を抽出するというような、地味な戦時研究に従事し、終戦の年の8月に、ドイツの物理学者の1939年の論文<sup>14)</sup>を勉強した直後に、『仁科文書』を手にして、之を読む機会に恵まれ、戦争が終わって数日後に広島を訪れ、『この世のはじめ』の地球上では、ウランの連鎖反応のような現象が、天然に起こっていたに違いないと考えるようになったのである。

アメリカ政府は第2次世界大戦後の最初の核実験を、西南太平洋のビキニ島において、1946年6月30日と7月24日の2回行った。いずれも23キロ・トンの原子爆弾で、前者はB29から投下し、海面上空500メートルで爆発させ、後者は水面下90フィートの、はじめての水面下の核実験であった。それには戦前から日本海軍の誇りであった戦艦『長門』や、アメリカ海軍の戦艦『アーカンソー』、ならびに航空母艦『サラトガ』などが、標的艦として使われたが、あるものは核爆発直後に、あるものは7時間半乃至5日後に沈没したといわれている。

日本海々戦で東郷元帥の旗艦であった戦艦『三笠』も、この核実験の標的艦として使われる予定であったが、その運命から救ってくれたのは、アメリカ太平洋艦隊指令長官ニミッツ提督であった。彼は東郷提督から、海軍の戦術だけでなく、日本の『武士道』の精神

も学んだのである。そのため、戦艦『三笠』は現在まで『三笠記念館』として横須賀市に保存されている。

## 6. 原爆から水爆へ

1866（慶応2）年にダイナマイトを発明したノーベルは、世界中の人たちから、近代戦を可能にした発明家として知られるようになったが、本来は孤独な理想主義者であって、彼の発明した爆薬は、戦争をあまりにも恐ろしいものにして、この世からなくなるであろうと考えていた由である。しかし、ダイナマイトはその目的を果たすことなく、19世紀か

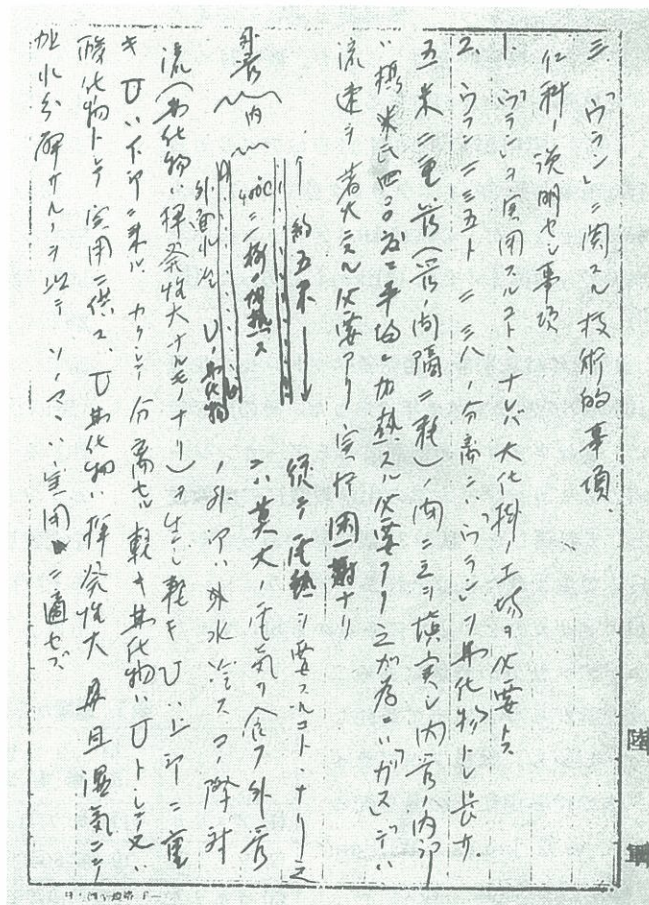


図6 『仁科研究室ニオケルU研究打合せ事項』と題する1943年7月6日付の陸軍の機密文書



ら20世紀にいたるまで、戦争は無くならなかった。

1945年の夏、アメリカの科学者たちは、従来の火薬を使った爆弾より、桁ちがいに威力を持った核兵器を作って、トルーマン大統領はこれを実戦に使用する命令を下したが、これは当時のアメリカ政府の指導者や、科学者たちの多数意見に従った上のことであった。その頃、トルーマン大統領に核兵器の実戦における使用に反対する意見をのべたアイゼンハワー氏は、1952年にアメリカの大統領となったが、アメリカ政府が原子爆弾よりも、桁ちがいの威力を持つ、水爆の核実験を行うことに反対しなかった。核兵器を実戦に使用することと、核実験を行うことを、彼ははっきりと区別していたのである。

1952(昭和27)年10月31日にアメリカ政府は西南太平洋のエニウェトク島で第1回の水爆実験を行った。これは10.4メガトンの水素爆弾で、通称『マイク(Mike)』であった(図7)。

1952年は放射能の発見者ベッケレルの生誕100周年を記念すべき年であった。その同じ年に、私はアメリカの南部にあるアーカンソー州のアーカンソー大学の化学教室に、助教授として赴任した。私が35歳の時であったが、日本で生まれた私はそれまでアーカンソー州がアメリカのどの辺りにあるかも知らず、たかがアメリカの僻地にある二流大学だろうと思って赴任した。しかし、戦後フルブライト法で世界中にその名を知られていたJames William Fulbright(1905-1995)は、1935年から1936年までアーカンソー大学の法学部の教授

で、更に1942年に上院議員となるまで、アーカンソー大学の学長を勤めた。現在のアメリカ大統領クリントン氏もアーカンソー州の生まれで、若い頃、アーカンソー大学の法学部で教鞭をとっていたことがある。

1952年の第1回の水爆実験からの放射性フォールアウトは、原爆の場合よりも遥かに大きく、翌年の1953年夏のアーカンソー州に降った雨の人工放射能は著しいものであったから、私は『ニュークレオニクス』誌の1953年12月号に、それについて短い論文を発表した。<sup>16)</sup>ところが驚いたことには、私は上司から『雨の放射能に関する研究を直ちに中止せよ』という命令を受けた。一般の科学者によるフォールアウトの研究は、当時アメリカ政府によって軍事秘密として禁止されていたのである。

1952年のアメリカ政府による第1回水爆実験から、1年もたたぬ1953年8月にソ連政府は第1回水爆実験を行い、続いて1954年2月28日に、アメリカ政府は西南太平洋のビキニ島で、15メガトン級の水爆、通称『ブラボー(Bravo)』の核実験を行い、有名な『福龍丸事件』を引き起こした。それは私たちが、アーカンソー大学で雨の人工放射能に関する論文を発表した『ニュークレオニクス』誌の1953年12月号が、日本に到着した直後のことであった。

表1 原爆から水爆の開発に要した期間<sup>17)</sup>

	第1回 原爆実験	第1回 水爆実験	開発に要した 期間(年)
(1) アメリカ	1945年7月16日	1952年10月31日	7
(2) ソ連	1949年8月29日	1953年8月12日	4
(3) イギリス	1952年10月3日	1957年5月31日	5
(4) フランス	1960年2月13日	1968年8月24日	8
(5) 中国	1964年10月16日	1967年6月17日	3

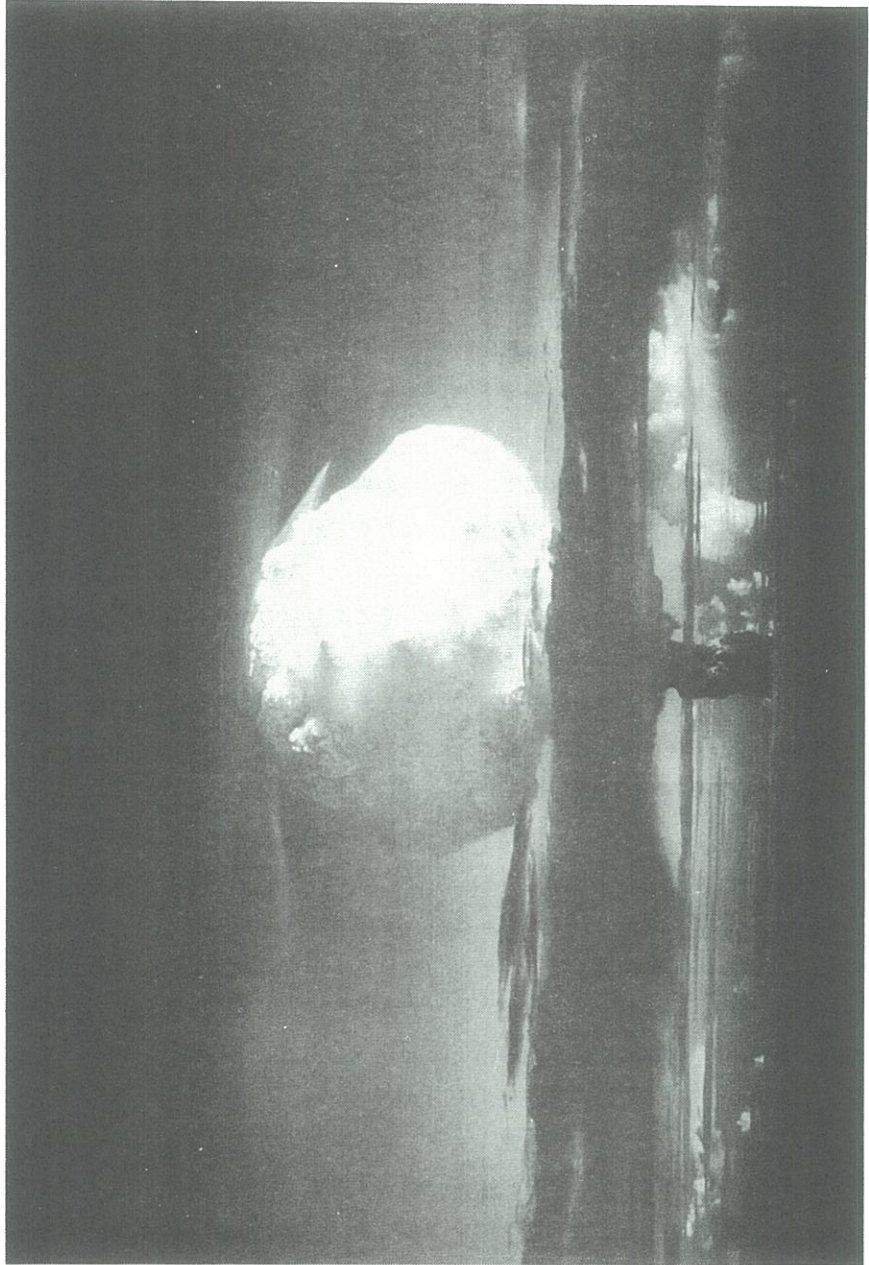


図7 1952年10月31日にアメリカ政府が南太平洋のエニウェトク島で行った第1回の水爆実験

表1に示すように、1945年のアメリカの第1回核実験から4年後の1949年にソ連は第1回の原爆実験を行い、さらに第1回の水爆実験を1953年8月に行った。そして、イギリス、フランス、及び中国もそれぞれ原爆と水爆の保有国となった。

『福龍丸事件』で日本全国が大騒ぎとなった1954年に、アメリカのアルゴンヌ国立研究所とロス・アラモス国立研究所の科学者たち<sup>18)</sup>は、1952年10月31日の第1回水爆実験『マイク』からの放射性フォールアウトの中から、半減期 $8.2 \times 10^7$ 年の<sup>244</sup>Puを発見し、更に1955年にはカリフォルニア大学のシーボルド(Glenn Theodore Seaborg, 1912 - )教授とその共同研究者たち<sup>19)</sup>は、同じ水爆実験からフォールアウトの中から新しい超ウラン元素である『99番元素(アインスタイニウム)』と『100番元素(フェルミウム)』を発見した。しかし彼等はその後、原子番号が100より大きい超ウラン元素を合成することに全力を注入し、超ウラン元素の中で最も寿命の長い、<sup>244</sup>Puの発見をあまり重要視しなかった。

## 7. 天然原子炉の発見

フェルミの原子炉の理論<sup>20)</sup>は、1942年以来、軍事秘密としてその詳細は発表されていなかったが、1954年に彼が胃癌のために53歳でこの世を去った頃には、その秘密が全面解除となった。そこで私は早速、彼の理論を天然のウランの大鉱床に適用して、ウランの連鎖反応が臨界点以上(critical)になる確率を、地質年代の函数として計算してみた所、ウランの大鉱床の中では、地球の地質年代のいかなる時点においても、ウランの連鎖反応はクリティカルにならなかったという意外な結論となった。つまり、天然原子炉は地球上には

決して存在しなかったということである。

フェルミの理論<sup>20)</sup>によれば、中性子増倍率( $k_{\infty}$ )は次の式で示される：

$$k_{\infty} = \epsilon \rho \frac{f}{\eta} \dots \dots \dots (1),$$

ここに $\epsilon$ は速中性子による核分裂効果で、その値は1よりすこし大きい。 $\rho$ は共鳴吸収を逃れて熱中性子になる確率で、 $f$ は熱中性子利用率で、 $\eta$ は<sup>235</sup>Uが1個の中性子を吸収したときに発生する中性子数で、

$$k_{\infty} \geq 1 \dots \dots \dots (2)$$

の場合にはウランの連鎖反応はクリティカルとなる。

そこで $k_{\infty}$ の値を地質年代の函数として計算すると、 $f$ と $\eta$ の値は地質年代の増加と共に増大するが、 $\rho$ の値は逆に減少して、 $k_{\infty}$ の値は1に近づくが、決して1より大きくはならない。

秘密となっていたフェルミの理論を知っていたアメリカの科学者たちは、このことをとっくの昔から承知していたのである。しかし私は、このような計算から得られた結論が、誤りであることに気がついた。それは何故かというところ、ここで単純化し過ぎた仮定が一つ入っているからである。

フェルミの理論を天然のウランの大鉱床に適用する場合、以上の計算では表2のモデル(I)に示すような、『ウランの大鉱床が地質年代のある時点において、地球上に突然出現した』という仮定が用いられている。

ところが、実際にはそのようなことは起こらないから、これは明らかに単純化しすぎた仮

表2 フェルミの理論をウランの大鉱床に適用する計算に使われる仮定

モデル	仮定	結論
(I)	ウランの大鉱床が地質年代のある時点において、地球上に突然出現した。	$k_{\infty}$ の値は決して1より大きくならなかった。
(II)	ウランの大鉱床が生成するには、微量のウランが母岩から水で浸出され、運搬されてから、ある地点で沈澱し、更に乾燥される必要がある。	20億年ばかり昔に、 $k_{\infty}$ の値は、容易に1より大きくなった。

定である。そこで、表2モデル(II)に示すような、いくらか複雑ではあるが、地球化学的に見て、より現実的な仮定を使って計算してみると、20億年ばかり昔に、 $k_{\infty}$ の値は容易に1より大きくなったという結論が得られる。

そこで私は、このような計算の結果<sup>21)</sup>を1956年に発表して、20億年ばかりの昔、地球上のウランの大鉱床の中で、ウランのクリティカルな連鎖反応が起こった筈であるという、天然原子炉の存在を予言したのである。そして、予言通りの天然原子炉の化石が、1972年にフランスの原子力研究所の科学者たちによって、アフリカのガボン共和国にあるオクロというウランの大鉱床で発見され、『オクロ現象』として世に知られるようになった。<sup>22-32)</sup>

20世紀の中頃まで、科学者たちは元素合成のような大規模の核反応は、星の中だけで起こると信じていたが、オクロ現象の発見によって、そのような『原子核の火』が20億年前の地球上に存在していたという事実が明らかとなった訳である。したがって、このような天然原子炉の化石の研究によって得られる新しい知識は、人工放射能による人類の環境汚染という、難しい問題の解決に寄与する所が大きいと期待される。

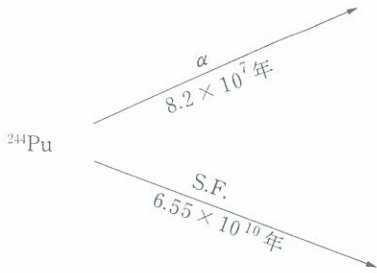
## 8. プルトニウムー244物語

私が天然原子炉の理論を発表した1956年の翌年、1957年10月にソ連は世界最初の人工衛星『スプートニク』の打ち上げに成功して、『宇宙開発の時代』がはじまった。そして3年後の1960年の1月に、カリフォルニア大学のレノルズ教授<sup>33)</sup>は、隕石から抽出した希ガス元素ゼノンの同位元素組成を測定した所、その中に<sup>129</sup>Xeの過剰が存在し、それは半減期1600万年の消滅核種<sup>129</sup>Iのベータ崩壊によって生成したものであるという、重要な事実を発見した：



この論文を読んだ私は、同じ年の1960年に、隕石から抽出したゼノンに、半減期1600万年の消滅核種<sup>129</sup>Iのベータ崩壊生成物の<sup>129</sup>Xeの過剰が存在しているなら、Iよりも長寿命で、半減期が8200万年の消滅核種<sup>244</sup>Puの天然核分裂によって生成した、ゼノンの重い同位元素である、<sup>131</sup>Xe、<sup>132</sup>Xe、<sup>134</sup>Xe及び<sup>136</sup>Xeの過剰も存在する筈であることを指摘した。<sup>34)</sup>

このことは、隕石や月の試料から抽出した微量のゼノンの同位元素組成を精密に測定して、大気中に含まれるゼノンのそれと比較することによって、19世紀の後半に、アメリカ



$^{131}\text{Xe}$ 、 $^{132}\text{Xe}$ 、 $^{134}\text{Xe}$ 、 $^{136}\text{Xe}$  (安定)。

の化学者F.W.クラーク<sup>56)</sup>が考えたような、化学元素は星の中において、進化の過程によって、水素から出発して、軽いものから次々に重い元素が出来て行ったであろうという仮説を実験的に証明することが、20世紀の後半になって、可能になったことを意味する。

これまで人工元素であると考えられていた $^{244}\text{Pu}$ の天然における存在に関する研究の歴史は極めて複雑で、1960年から35年を経過した現在まで続いているが、最近得られた実験結果<sup>35,36)</sup>にもとづく計算によれば、隕石の中で最も原始的組成を持つと考えられている、C-1型炭素質隕石(Carbonaceous Chondrite)中における $^{238}\text{U}$ と $^{244}\text{Pu}$ の存在量の比は、50.7億年前に0.511(原子/原子)で、 $^{244}\text{Pu}$ の原子1つに対して、 $^{238}\text{U}$ の原子2つであった。そして、この値にもとづいて、現在の地球全体に残存している $^{244}\text{Pu}$ の総量を計算してみると、約27グラムという値が得られた。このことは、 $^{244}\text{Pu}$ は従来、『消滅核種』と見なされていたが、実は天然に存在する元素であったことを意味する。

1958年に出版された『超ウラン元素』と題する著書<sup>37)</sup>の第1章『プルトニウム物語(The Plutonium Story)』に、カリフォルニア大学のシーボルク教授は次のように述べている：『……………(この元素は第2次大戦中に発見され、その歴史は極めて魅力的で、興味を唆る

物語である。……………自然科学の分野における、他の重要な発見の中には、人類の生存様式の上に、これより大きくないが、少なくとも同等の影響を及ぼしたものが、あるかも知れないが、この元素の発見のように文字通り、人間の目の前で爆発したものはほかにない。プルトニウムの存在の世界に対する発表は、長崎に投下された核兵器という形式で行われた。この発見にまつわる歴史の物語は、ここで終わりとなるものではなく、将来、いくつかの新しい章が書き加えられるであろう……………)』。

今から丁度50年前の、1945年8月にアメリカの科学者たちが発見した、新しい人工元素 $^{239}\text{Pu}$ でつくった原子爆弾は、長崎に投下され、何万という犠牲者を出したが、不思議な因縁で、長崎からほど近い、北九州の福岡県で生まれた私は、20世紀の後半になって、この元素の最も長い半減期を持つ同位元素である $^{244}\text{Pu}$ は天然に存在するという事実を解明する研究に従事する運命となったのである。

## 7. おわりに

本稿を執筆する機会を与えていただいた九州大学名誉教授高島良正博士と、図1、図2、及び図7に示した写真を提供された、退役米空軍大佐ウィリアム・マイアー氏、ならびに図3を提供していただいた東京都の東郷神社権禰直、氷室

千春氏の御厚意に対して、感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) T.J.Page : Southern Historical Society Papers VII.No.6, 263 - 280 (1879).
- 2) R.Lathan : Confederate Veteran, Jan. - Feb.26 - 30 (1994).
- 3) W.S.Clark : Annalen der Chemie und Pharmacie 82 367 (1852).
- 4) H.S.Van Klooster : J.Chem.Education 158 (April 1944).
- 5) F.W.Clarke : Popular Science Monthly, 1873.
- 6) F.W.Clarke : Bull.Phil.Washington 11 131 (1889).
- 7) H.Becquerel : Compt.rend.Acad.Sci.Paris 122 501 (1896).
- 8) P.Curie and Mme. S.Curie : Compt. rend.Acad.Sci.Paris 127 175 (1898).
- 9) P.Curie, Mme.P.Curie, G.Bemont : Compt.rend.Acad.Sci.Paris 127 1218 (1898).
- 10) F.Joliot and I.Curie : Nature 133 201 (1934).
- 11) E.Perrier and E.Segré : J.Chem.Phys. 5 712 (1937).
- 12) Hahn and F.Strassmann : Naturwissenschaften 27 11 (1939).
- 13) S.Oana and K.Kuroda : Bull.Chem. Soc.Japan 17 397 (1942).
- 14) S.Flügge : Naturwissenschaften 27 401 (1939).
- 15) R.Rhodes : "The Making of the Atomic Bomb, "Simon and Schuster, New York, 1986, p. 375.
- 16) P.E.Damon and P.K.Kuroda : Nucleonics 11 59 (1953).
- 17) I.Zander and R.Araskog : "Nuclear Explosions 1945 - 1972 Basic Data", FOA 4 Report A 4505 - A1, April 1973.
- 18) M.H.Studier, P.R.Fields, P.H.Sellers, A.M.Friedman, C.M.Stevens, J.F.Mech, H.Diamond, J.Sedlet, J.R.Hrizenga : Phys.Rev.93 1433 (1954).
- 19) A.Giorso, S.G.Thompson, G.H.Higgins, G.T.Seaborg, M.H.Studier, P.R.Fields, S.M.Fried, H.Diamond, J.F.Mech, G.L.Pyle, J.R.Huizenga, H.Hirsch, W.M.Manning, C.S.Browne, H.L.Smith, R.W.Spence : Phys.Rev.99 1048 (1955).
- 20) E.Fermi : Science 105 27 (1947).
- 21) P.K.Kuroda : J.Chem.Phys.25 781 (1956).
- 22) P.K.Kuroda : J.Radioanalyt.Nucl.Chem. 142 101 (1990).
- 23) P.K.Kuroda : J.Radioanalyt.Nucl.Chem. 142 113 (1990).
- 24) P.K.Kuroda : "The Origin of the Chemical Elements and the Oklo Phenomenon, Springer Verlas, Berlin, Heidelberg"New York, p. 31 (1982).
- 25) P.K.Kuroda : Naturwissenschaften 70 536 (1983).
- 26) R.Bodu, H.Bouzigues, N.Morin, J.P.Pfiffelmann : C.R.Acad.Sc.Paris 275D 1731 (1972).
- 27) N.Neuilly, J.Busac, C.Fréjacques,

- G.Nief, G.Vendryes, J.Ivon :C.R.Acad. Sc.Paris 275D 1847 (1972).
- 28) G.Baudin, C.Blain, R.Hagemann, M.Kremer, M.Lucas, L.Merlivat, R.Molina, G.Nief, F.Prost – Marechal, F.Regnaud, E.Roth :C.R.Acad.Sc.Paris 275D 2291 (1972).
- 29 ) ” The Oklo Phenomenon ” , International Atomic Energy Agency, Vienna (1975).
- 30) M.Maurette : Annual Review of Nuclear Science 26 319 (1976).
- 31) 藤井 勲 : ” 天然原子炉, ” 東京大学出版会, 1 – 133 (1985).
- 32) 黒田和夫 : ” 17億年前の原子炉, ” 講談社, 1 – 199 (1988).
- 33) J.H.Reynolds : Phys.Rev.Lett.4 8 (1960).
- 34) P.K.Kuroda : Nature 187 36 (1960).
- 35) P.K.Kuroda and W.A.Myers : Radiochim.Acta 64 155 (1994).
- 36) P.K.Kuroda and W.A.Myers : Radiochim.Acta 64 167 (1994).
- 37) G.T.Seaborg : ” The Transuranium Elements ” , The Yale University Press, p.1 (1958).

