

技術文化論叢

第5号

東京工業大学技術構造分析講座

論文

- 深井 佑造
長岡半太郎の原爆開発構想 1
— 戦時中の日本の原子力開発のもう一つの考え —

資料紹介

- 山崎 正勝
旧日本海軍『F研究』資料 27

博士論文梗概（2002年）

- 河村 豊
第2次大戦期日本の科学技術動員に関する分析 77
— 旧日本海軍の電波兵器開発過程を事例とした —

修士論文梗概（2001年）

- 葉山 雅
言語と世界観の分析 92
— 「規約」という観点から —
- 伊藤 詠
電気めっき産業の技術的特質に関する研究 96
- 鈴木 秀人
制御技術への状態空間法の導入過程の分析 100
- 山口 陽子
Conics における図形的方法 106
-

論文



長岡半太郎の原爆開発構想

一 戦時中の日本の原子力開発のもう一つの考え一

深井佑造

梗概：戦時中の日本における原爆開発は理研の「二号研究」と京都帝国大学の「F研究」が主で、これらの研究は軽水減速の熱中性子利用を基礎としている。所が、長岡半太郎の原爆構想は高速中性子利用である。1939年3月に E. Fermi は米国海軍の代表者に「熱中性子利用の連鎖反応は制御可能で、高速中性子利用では爆弾」と述べた⁽¹⁾。広島市に投下された米国が開発した原爆は高速中性子利用である。米国開発の原爆と長岡構想との相違は、前者が自立連鎖反応（超臨界状態）の物理を基礎としているのに対して、長岡構想は臨界性を明言していない中性子増倍系の連鎖反応で、核分裂反応量の補完のために信管（強力中性子源）を併設するという概念を基にしている。²³⁵U濃縮度も前者の原爆は94%であるのに対して長岡構想は50%を限界と考えている。長岡構想での信管併設は現実には核爆発に対して十分な効果があるとは考えられない。しかし、提案されている長岡構想の動力への応用は、約60年後の現在、日本を含む各国で研究されている加速器原子炉の概念と全く同じである。

§ 1 長岡構想の論文の背景

昭和19年12月12日、雑誌『軍事と技術』に長岡半太郎は「原子核分裂を兵器に利用する批判」を発表した⁽²⁾。これは、当時、敗戦色が濃くなって来た日本で退勢挽回の必須の新兵器として巷に広がった安易な原爆待望論に釘を刺すために、原爆開発不可能を唱えた論文であった。そして、長岡は米軍の広島市への原爆投下が現実の事実であった事を理解するまで、原爆開発不可能論を信じていた。原爆投下の直後、技術院総裁の多田礼吉陸軍中將に呼ばれて、広島市への原爆投下について質問をされた際に、「これは原爆ではない」と答えている⁽³⁾。

『軍事と技術』掲載の長岡論文には、自己の構想を公表する理由として次のように書いている。“……原子核分裂は汎く注意を喚起し、新聞に雑誌に又議院に於てまで宣伝せられ、世間までが彼れ是れ問題に興味を感ずるようになり、余り葉が効き過ぎ、大衆は眩暈（注：幻惑）している感がある”（なお、以降の文で“☆☆☆”の内に示した文章は長岡論文に述べられている部分を再掲した）。これが長岡が憂慮した日本国民の安易な原爆待望論である。ここで、長岡の考えと行動を理解するために、同じ物理学者で原爆待望論者であった田中館愛橘と関連付けて長岡の経歴を簡単に述べる。長岡は田中館よりも7才年下であり、同じ東京帝国大学物理科の卒業生であるが5年後輩である。長岡は昭和12年4月に第1号の文化勲章を、田中館は遅れて昭和19年4月に授賜されているので、研究能力では田中館より優れていた。長岡が1908年にノーベル化学賞を授賞した E. Rutherford の原子核の構造モデルに匹敵する「土星モデル」の提唱者である事は有名である。しかし、貴族院議員への就任では田中館が大正14年10月であったのに反して、長岡は昭和9年2月と遅

れている。この遅れは長岡が政治と軍部嫌いであったが、田中館は古くから軍部に関係し⁽⁴⁾、むしろ政治的な行動が多かった経歴から来ている。こうした二人の経歴と性格から、長岡は田中館を批判する態度があったと言われている⁽⁵⁾。さて、長岡が憂慮した“……新聞に雑誌に又議院に於てまで宣伝せられ、……”の事実とは、新聞の報道では昭和19年3月29日や同年7月9日の朝日新聞の記事等、雑誌の記事では昭和19年1月号や同年2月号の科学雑誌『科学朝日』所載の解説記事等を指していると思われる。“議院に於てまで”は昭和19年2月7日第84回貴族院本会議での田中館議員の発言を指すと考えられる。同じ議員として議会で田中館議員の発言を聞き、持ち前の「田中館を批判する態度」の一環として自己の原爆開発不可能論を公表する気持ちに駆られたと想像される（当時の日本の巷に広がった原爆待望論の実状について、筆者は「[マッチ箱一つ]の行方を追って」という題目で詳細を後日発表する予定にしている）。

それでも、当時の時勢は長岡の科学知識を軍事研究に結び付ける機会を与えた。海軍の肝入りで昭和17年7月8日に発足した『核物理応用研究委員会』には委員として長岡は参加している。そして、昭和18年3月6日に開催された最後の委員会では「米国といえども今次の大戦においては、おそらくは原子力活用を実現することは困難ならん」という結論を下した⁽⁶⁾。この結論も長岡に原爆開発不可能論を信じさせる一つの原因になったと考えられる。

しかし、当時軍関係機関からの依頼による原爆開発の研究は2ヶ所で極秘で進められていた。それらの研究は長岡が所属していた理化学研究所（理研）の陸軍委託「二号研究」⁽⁶⁾と京都帝国大学荒勝文策教授教室の海軍委託「F研究」⁽⁶⁾である。従って、長岡が当時の原爆開発研究の内容に全くの無知であったとは考え難い。公式の計画について、ある程度の研究内容を知っていた上での原爆開発不可能論であれば、科学者としての立場から彼自身の原爆開発に対する科学的な構想があったと考えるのは極めて自然ではないか。そこで、『軍事と技術』の長岡論文「原子核分裂を兵器に利用する批判」の内容を物理的に詳細に検討をすれば、長岡の原爆構想が当時の公式な「二号研究」や「F研究」の構想とは別の 一戦時中の日本の原子力開発のもう一つの考案が浮かび上がって来るであろう。さて、彼の論文作成の過程を記した長岡日記の部分には⁽⁶⁾、

昭和19年9月22日、理研……。終日U235に就き調べる。原子エネルギーを実行に

移すは困難多数あり。信管の製作が大難関である。

10月9日、核分裂の批判成る。皆川[理]と之を論じ約2時間を費やす。とあり、10月12日には出来上がった原稿を『軍事と技術』誌に送付している。ここで、注意すべきは長岡論文の作成に、ウラン連鎖反応の物理に詳しい理研の皆川理副研究員が関与している点である。皆川は実験核物理学の専門家で、サイクロトロンを使用してDイオンを加速し標的Li核やBe核に当て、発生した高速中性子と熱中性子をRhとWに照射して、生成した放射性核種 ^{102}Rh と ^{186}W からの β^+ や β^- 崩壊の半減期を測定するという研究業績がある⁽⁷⁾。又、昭和18年度の日本数学物理学学会年会には計数管の問題を発表している⁽⁷⁾。通常実験物理屋は共同研究者との共著が多いのに彼は全部の研究を単独で発表している。謝辞欄では、理研の英文論文には上司である長岡と仁科芳雄に「their kind interests throughout this work」と共通に表しているが、*Phys. Rev.*の2論文では長岡には「his interest and kind encouragement throughout this work」、仁科には「his kind suggestion and

discussion」と分けて謝している。皆川は昭和8年、東京帝国大学物理学科卒業後、理研長岡研究室に助手として就職した独立独歩の真摯な実験物理屋という印象がある。『軍事と技術』に長岡が論文を発表する際に、皆川に核物理学の専門家として相談を持ちかけた理由が納得出来る。又、皆川は玉木英彦と調査して発表した日本数学物理学会誌昭和15年7月号の共著論文「中性子衝撃に依る重い原子核の分裂(II)」に⁽⁶⁾、Halban-Joliot-Kowarski, Flügge, Perrin, Adler, Halban-Joliot-Kowarski-Perrin, Adler-Halbanの論文を参照して、当時のウランの核分裂連鎖反応の研究の現状を詳細に論じて、「然し乍ら……精しい data 及び計算に入ってくる種々な data のより正確な値が無ければ chain reaction の起こる可能性を決定する事は出来ない」と述べている。以上に述べた皆川の核物理学の知識が10月9日の長岡との約2時間に亘る議論によって、長岡に受け入れられ彼の論文に影響強く反映されたと考えられる。

従って、発表された長岡論文の内容は科学的には当時としては信頼性の高い内容を基礎にしていると考えてよい。そこで、以下は長岡論文の物理的内容を長岡・皆川の構想と呼ぶことにする。更に、当時の日本の原子核物理研究の主流は、理研の研究員達による多くの論文発表に見られるように⁽⁹⁾、高速中性子による種々の核反応に対する研究であったという背景も無視する事は出来ない。

§ 2 長岡論文の結論

長岡は“敢て卑見を要約すれば”と書いた後、結論を次のように述べている。

“○諸元素に就き核分裂の状況を調べ、これを数値的に測定すること。

即ち²³⁵Uのみに拘泥せぬこと。

○信管の考案製作を急ぎ貯蔵を可能ならしむること。

○同位元素の分離を迅速にする方法を研究すること。

等を主眼として進行せねば、……、空中の樓閣とはこんなものであろうかと存じます”。更に、重ねて“信管を製作するが先決問題であります。これが不可能ならば先の見透しはつきませぬ”と結んでいる。

上に示した第1項目の“核分裂物質として²³⁵U以外の元素”を考慮して研究を進めよという提案は、長岡・皆川の構想に関連する2項目以下の提案とは異質のように感じられる。そこで、ここで第1項目が具体的に何を想定しているのかを考えて見る事にする。長岡の論文に“或は又²³²ThをUと混和して分裂して見たらば、(238)（注：長岡の論文では、(238)は²³⁸Uを(235)は²³⁵Uを示している）も分裂しはしまいかと疑を抱くのである”と述べているので、先ず、第1項目の問題としてThを考えた事は確かである。当時、²³²Thの高速中性子による核分裂は確認されていた。しかし、続いて“トール(注：Th)はウランより原料豊富であるけれども、数百万エレクトロンヴォルトの中性を打込まねばならぬ故、Rn-Beでは分裂しないかも知らない”と否定的な見解を述べている。この見解にも、皆川が持っている核物理の知識の影が見える。現在では、高速中性子による核分裂効果は²³⁸Uも²³²Thも略同程度である事が判っているが、高速中性子による²³⁸U核分裂発見の方が²³²Thの場合よりも早い。当時、理研ではサイクロトロンを用いて高速中性子による²³²Thの核反応の研究が行われていたという事情から⁽⁹⁾、長岡の論文に

“……²³²Th を U と混和……” という希望的なアイデアが生まれたと思う。実は、彼らが Th の核分裂について “……Rn - Be では分裂しないかも判らない” と書いているのは問題であると思う⁽¹⁰⁾。

第1項目に関しては、²³⁹Pu の問題を避ける訳には行かない。米国で Pu が生産されて長崎市に原爆として投下された事実は周知の事である。W. Heisenberg はドイツでも1940 (昭和15)年夏には C. F. v. Weizsäcker によって²³⁹Pu の生成と核分裂性が理論的に予言されていたと言っている⁽¹¹⁾。平成7年10月2日朝日新聞夕刊「幻の原爆開発」の記事に理研の田島英三の談話として「ウランに中性子が当たる94番目の元素ができ、それが核分裂を起こすことは推定できた」とある⁽¹²⁾。この推定は皆川・玉木の日本数学物理学会誌の2件の共著論文「中性子衝撃に依る重い原子核の分裂」の内容分析から確認出来る⁽¹³⁾。かようにして、²³⁹Pu の問題は長岡の提案を受けるまでもなく関係研究者の意識にはあった。

日本の話ではないが、この項目に関しては当時のドイツの考えの方は進んでいた。再び、Heisenberg によると⁽¹¹⁾、1942(昭和17)年6月6日のドイツの公式の原子力開発計画 (通称U計画) の第2回会議で Heisenberg は²³¹Pa を原爆の爆薬として考えた事を次のように報告している。「Pa の必要量を用意する事は実際的ではないが、Pa を核爆薬として考えた。何故ならば、この原子核は 0.1 MeV 程度の中性子エネルギーにて核分裂を起こし、続いて高速中性子による連鎖反応の可能性を持つからである」。²³⁸U は半減期 7.038×10^8 年の α 崩壊で²³⁴Th に変換する。そして、²³⁴Th は半減期 25.52時間の β 崩壊で²³⁴Pa に変換する。即ち、天然U中に²³¹Pa は ppm のオーダーの微量で存在する。これを化学的に天然Uから取り出す事は原理的には可能であるが、微量のため実際は役に立たない。

さて、2項目以下の提案は長岡・皆川の構想に関連するので、長岡の論文から関係する字句を次章に抜き出す事にする。ここで、注意すべきは次の点である。長岡も皆川も真摯な科学者であるので、当時の科学・技術の知識水準を十分に認識した上で、自己の論旨を展開する事に慎重で次のような形式を採用している。自己の述べた内容に対して、その実現が非常に困難で、又、当時の科学・技術の水準では正確に見通しが得られないと考えられる点に関しては、断定出来ない、又は、否定的な見解を続いて述べるという形式を採用している。そこで、関係するとして引用した文章について、彼らが、その論旨が不確かさを持つと考えて、更に述べた部分を、続けて次の括弧【☆☆☆】内に示した。そのような形で展開されている議論が多い事に注意して、ここでは、括弧【☆☆☆】の字句に囚わられる事なく、括弧【☆☆☆】の前段で述べられている内容こそが長岡・皆川の構想を示していると考えた。

§ 3 長岡・皆川の前爆構想

3.1 核爆発エネルギー

長岡論文には“原子核分裂を利用する爆弾は材料少量であっても、激甚なる効果を生ずる点に特徴がある。従って普通の火薬を充填するものより、この形は小にして重量は軽く、その威力は普通弾を超越する”と書かれている。即ち、前爆は小型であるにも拘らず通常の爆弾よりも強烈な爆発威力があるという特徴を述べて、その爆発動作の原理を次のよう

に説いている。“……原子核の転換分裂等の操作には専ら中性子に頼らねばならない。…
…、中性子には正当な速度を与え、処理せんとする原子に当てねばならぬ……、大量の爆
薬を要する代わりに原子核に包蔵されるエネルギーを少量の原子群で置換えるが主眼であ
る……”。“……原子核分裂に在っては……、核一つに付、一個の中性子を捕獲して分裂
するのである。一塊の原子群を分裂するには少なくとも原子の数だけは中性子を供給せね
ばならぬ。その数は莫大なものである。……、中性子は空気中に存在しないから、十分な
量を特殊な方法により送り出し、原子核が捕獲するように仕向けねばならぬ。【これが大
なる難関であって】、……信管の問題と絡んで来る”。

長岡・皆川の構想にある“中性子には正当な速度を与え”とは、彼らが後に述べている
ように高速中性子利用の事である。熱中性子利用では ^{235}U に熱中性子が吸収されると吸
収された割合の内 85%だけが核分裂する。残りの 14%の ^{235}U は分裂しない事は当時の京
都帝国大学の荒勝文策研究室でも観測されていた⁽⁶⁾。高速中性子利用では、この割合は
93%(表 B 1 参照)で殆ど核分裂する。従って、彼らの“核一つに付、一個の中性子を捕獲
して分裂する”と言う表現は略正しい。そこで“一塊の原子群を分裂するには少なくとも
原子の数だけは中性子を供給せねばならぬ”事になる。即ち、この構想では、

$$\text{中性子の必要量} = \text{核分裂するU核の数} = \text{核爆発エネルギー} \quad (1)$$

という方式を示している。高速中性子利用であるから、 ^{235}U と ^{238}U の両原子核が核分裂
する(なお、長岡論文では“ウラン”や“U”という語は天然ウランを指している)。

“一塊の原子群”を 1g のUとして、核分裂によって発生する核爆発の威力を計算する。
1g のUに含まれる原子核数は 2.5×10^{24} 個であるから、

$$\text{中性子の必要量} = 2.5 \times 10^{24} \text{個} = \text{核分裂エネルギー} : 1.9 \times 10^7 \text{ Kcal} \quad (2)$$

$$\text{即ち、} 1 \text{ g のUの核分裂エネルギー量} = \text{TNT換算} : 21 \text{ ton} \quad (3)$$

となる。ここで、1回の核分裂によって発生するエネルギーを 200 MeV、TNT火薬換
算率を 900 Kcal/KgTNT とした。8月6日の広島市への原爆投下直後、米国大統領 H. S.
Truman は「広島に使用した原爆は TNT20kton の威力に相当する」という声明を発表した。
声明と(3)式から広島型原爆では約 0.9 Kg のUが核分裂し、

$$\text{広島型原爆の核分裂中性子全数} : N = 2.5 \times 10^{24} \text{個} \quad (4)$$

である事が判る。昭和19年3月29日と同年7月9日の朝日新聞記事には「〔マッチ箱1つ〕
のUで London 市全体を壊滅させる事が出来る」とある。マッチ箱は日本規格家庭並型で
 $5.6\text{cm} \times 3.6\text{cm} \times 1.8\text{cm} = 36.3\text{cm}^3$ の体積で、長岡論文でも“ウランの如き比重 19に近
きもの”とあるので、掌に乗ってしまう〔マッチ箱一つ〕のUの重さは約 0.7 Kg になり、
これは広島市投下の原爆と略同じ爆発威力に相当する。

3.2 “信管”(強力「中性子源」)の問題

中性子の必要量を如何にして得るかという問題に移る。長岡・皆川の構想では中性子を
発生する“信管”を必要としている。中性子を得る手段としては、核物理実験で用いられ
る「中性子源」と「加速器」がある。爆弾に課せられる軽量性からすると、当然、「中性
子源」の採用が考えられる。“核の分裂に入用な装置を戦場に於て実験室と同様に整備す
ることは許されない。必ずや簡単な信管に相当するものを案出せねばならぬ、……【原子
核の分裂を造作もなく誘導し得ると考えては、錯誤の甚しきものである】”。“【高压高
温等によりウラン核の分裂を誘起し得るべしとの考は放棄せねばならぬ】。畢竟分裂を促

す信管を造るには、その際原子に侵入する中性子に都合好き速度を与えねばならぬ故、…、核構造に実質上必要なる要素をこれに適用するように努めねばならぬ”。「中性子源」は“ラドン (Rn) とベリリウム (Be) を用いて中性子を発生せしむる。…。ラドンは五日足らずでその性能を半減する故⁽¹⁴⁾、かゝる信管を使用前に作り貯えて置くことは不可能である。……。次の問題はラドンを発生するラジウムの量である⁽¹⁴⁾。所要のウラン核を分裂せしむるに費やされるラドンは、近時の戦争では可なり量の量を要するであろう。……。大戦前消息通の報ずるところによれば、ドイツには当時約 300グラムのラジウムがあった。若しドイツで原子核を兵器に使用する企図があったとすれば、……。現時ドイツが保有するラジウムは 1 匁を超えているかも知れない (……)。これ程の分量があれば今記したような信管を使用した兵器用の分裂試験を施行できる【が、その有無は判然としない】”。

これらの考えを基にして、結論に “○信管の考案製作を急ぎ貯蔵を可能ならしむること” を提案している。α崩壊する原子核からの α 粒子による Be (α, n) 反応を用いるのは核物理的に合理性がある。そして、(α, n) 反応の強さは入射する α 粒子の運動エネルギー値に依存する。しかし、この「中性子源」の強度と寿命は両立しない。強度を重要視すれば単位時間当たりに α 粒子発生が多い核種を選ばねばならぬ、これは α 崩壊の短い半減期の原子核である。即ち、この「中性子源」は寿命が短くなる。現在では、α-emitter としては ²²⁶Ra、²²⁷Ac、²⁴¹Am、²⁴²Cm、²⁰⁹Po (半減期: 102年) と自発核分裂 (s. f.) の ²⁵²Cf が考えられている。長岡の論文に主張されているように、「中性子源」の軽

表 1 中性子源の強度 (単位: n/s.g) 量性を重視すれば単位重量当たりの発生中性子数が問題になり、これは ²⁰⁹Po の場合を除き表 1 のようになる⁽¹⁵⁾。この表は長岡が結論で強く主張した当時から見た未来の“信管”の姿である。しかし、現在の核物理実験での中性子源の採用時の判断基準は軽量性にあるのではなく、α-emitter や ²⁵²Cf の入手可能性にある。当時は ²²⁶Ra 以外には入手が出来なかった^{(16) (17)}。そこで、長岡論文に書いてある“現時ドイツが保有するラジウムは 1 匁”が長岡・皆川の構想での「中性子源」の最大限の強度: S を実現せしめたとする、S は次のようになる。

$$S = 1.3 \times 10^{10} \text{ n/s} \quad (5)$$

3.3 中性子増倍媒質系の提案

長岡・皆川の構想では臨界性を明言していない連鎖反応体系で中性子数の増倍を意図している事が次の文章から窺われる。“原子核分裂は……、その材料の多くはウラン系の元素に属し中にもウラン同位元素 ²³⁵U が着眼されている。これは速い中性子でも遅い中性子 (即ち熱中性子) でも分裂し得る……。而して ²³⁸U は極く速い中性子でなければ分裂しないから、双方を同時に分裂するには、可なり速い中性子を使はねばならない。然し行く行く研究が進めば終に (235) の分裂に伴って発する中性子が (238) に働いて、自ら分裂せしむることも可能ではないか【と樂觀する人もあるが、今は単に想像に過ぎない】。然るに U では (238) が主体であって、U 百分中 (238) は 99.28 を占め (235) は僅かに 0.71 に過ぎない。……。又 (238) をも連鎖的に分裂するに成功すれば、更に偉大なる成果を擧げる…

…”。“……ウランは同位元素の集合体である故、数個のウラン同位元素が連鎖的に分裂可能でなければ、実用にはならない”。“兎も角Uの全同位元素を連鎖的に分裂させる方法を講ぜねば分裂エネルギーの効用を非常に減殺し、能率は悪くなる。この要路にある阻塞を突破するが、研究題目である。【将来の発展はこの障礙が除かれるや否やで決すると思う】”。

長岡論文は、高速中性子利用の ^{235}U と ^{238}U の混合系での臨界性は全く明言しておらず、そして、前節に示したような「中性子源」からの高速中性子の直接照射によっても、それ単独では十分に核分裂反応量が得られそうもないとも考えている事が判る。しかし、この混合系で中性子数の増倍を考えているようなので、強力な「中性子源」による核分裂反応量で補完すれば、こうした混合系でも原爆が出来るのではないかと期待していたと思う。皆川・玉木の論文では、天然Uに対する高速中性子核分裂断面積を0.1bと示している⁽⁸⁾。現在の核データを、核分裂反応で発生した中性子エネルギー・スペクトルを用いて平均した核分裂断面積を評価すると、付録Bに示したように、 ^{235}U については1.233 b、 ^{238}U については0.2996bになる（即ち、天然Uは0.3033 b）。従って、長岡・皆川の構想で期待しているように、「中性子源」からの高速中性子による ^{235}U と ^{238}U の核分裂によって中性子増倍効果は可能である。

長岡論文が発表された同じ時期、昭和19年11月学術研究会議原子核分科会の席上、彦坂忠義によって「原子核エネルギー利用の一方法に就いて」という論文が発表された⁽¹⁸⁾。彼は「若し同位元素分離をせぬままでウラニウム分裂の連鎖を起させ得るならば、其利便は量り難い。幸い本論の結果では、高速中性子を使ひさへすればそれが出来さうだとの見込みに成った。……、基礎量の測定値が不十分である為に、上の結論も結論だけの価値は高いとは言へぬであらう。ただ著者は全然注目さへされたことの無かった高速中性子法がなかなか有望であること、……を、出来るだけ定量的に示したかったのである」と結んでいる。上の彦坂の結論の最後の記述から、長岡と彦坂との接点はなく、又、彼らの研究のグループ同士も全く交流がなかった事が読み取れる。前半は天然Uの体系でも連鎖反応が実現するという結論であるが、長岡論文の“……ウランを使用する場合には堆積する量を必要とする。これに昼夜間断なく入射して来る宇宙線を遮断するのは容易ではない。……。併し宇宙線がある物質に当たって中性子を誘発しないとは云われぬ。然らば自発的爆破を招く虞れもなきにしもあらず、……。大量のウラン鉱を処理している所でこんな椿事が起ったとは、嘗って聞いたことがないからまず安全と看做してよかろう”という記述から、もし、長岡が彦坂の結論を聞いたならば、これは現実には正しくない指摘したであろう。

彦坂論文は、天然Uの無限大体系で ^{238}U 核分裂を含めた体系全体の核分裂反応量を高速中性子利用では重要な研究項目である ^{238}U の非弾性散乱反応を考慮した計算である。系内の中性子エネルギー・スペクトルは ^{238}U の非弾性散乱反応によって核分裂スペクトルよりも低いエネルギーの中性子の部分が相対的に大きくなる。そして、 ^{238}U の核分裂反応のしきい値：約1 MeVの存在によって、上に示した0.2996 barnの平均核分裂断面積は更に低下する。こうした効果を十分に考慮した論旨の展開である。しかし、高速中性子利用の連鎖反応では体系からの高速中性子の漏れの効果が更に重大な検討項目である。昭和18年度の日本数学物理学学会年会では、彦坂は「U分裂エネルギー利用の問題」という題目で研究発表をしている⁽¹⁹⁾。発表の内容の詳細は伝わっていないが、抜粋として「U

分裂の際生まれる中性子が更に次の分裂をひき起こしてゆく反応の連鎖を考察し、鎖が切れずに続き得るための条件の内、特に容器の大きさの問題を吟味する」という文言が残されている。即ち、彦坂は昭和19年11月学術研究会議の発表の約1年前には、連鎖反応では体系からの中性子漏れの効果：容器の大きさの問題が重要な点である事を十分に理解していた筈である。しかし、1年後の「原子核エネルギー利用の一方法に就いて」の論文で中性子漏れの効果を無視する計算をして、「高速中性子を使ひさへすれば それ（注：連鎖反応）が出来さうだとの見込みに成った」という結論を発表するのは、連鎖反応研究についての彼の論理に飛躍があると考えられるであろう。

現在の知識では、無限大の寸法の ^{235}U と ^{238}U の混合系で高速中性子利用により連鎖反応を実現出来る ^{235}U 濃縮度の限界値は、 $5.56 \pm 0.02\%$ である⁽²⁰⁾。

3.4 長岡・皆川の構想での ^{235}U 濃縮度

長岡の論文の結論に、“○同位元素の分離を迅速にする方法を研究すること”と書かれているのは、前節に示したように、中性子増倍媒質系の ^{235}U と ^{238}U の混合系では天然Uの組成では役に立たず、「二号研究」の場合と同様に ^{235}U 濃縮技術の開発が必要と考えているからである。その目標の濃縮度は“若しUの原子量235なるもののみが役に立つという帰結になれば、238からこれを分離する操作は容易ではない。これに要する時間と努力とを考えれば、235のみを利用する計画は実行に移し難い”と述べているように、広島市投下の米国の原爆に使用された94% ^{235}U 濃縮度を考えているのではなく、“こんな信管で易しく(235)のウランが分裂するならば、連鎖的に(238)まで含めて分裂せしむることが可能ではないかと思われるけれども、いかにせん(235)は僅かに140分の1位の量だけ存在するから、その分裂によって発生する中性子は寡くして(238)を分裂するには不十分であろう。従って、(235)を抽出して(238)と同量位にしたならば、ウランの全同位元素は分裂するのではあるまいか、【(235)の出す中性子のエネルギーが測定されてあれば問題は自ら解決するけれども生憎それが判明しない】”とある。即ち、長岡・皆川の構想での ^{235}U 濃縮度は50%を考えているのが判る。

昭和19年11月17日、東京第二陸軍造兵廠の信氏中將に対して理研の仁科芳雄は次のように答えている⁽⁶⁾。「U235含有率0.7%ト10%トノ間ニハコノ数量（注：臨界量の事）ニ余リ変リハナイガ含有率が50%以上トモナレバ大分変ッテ来ルカモ知レン。然シ50%ニスルコトハ相当困難デアルシ、100%ニスルコトハ不可能ダラウ」。即ち、当時関係研究者は ^{235}U 濃縮度50%位までは濃縮可能で限度であるが、米国のような濃縮度94%の ^{235}U は生成不可能と考えていた。長岡・皆川も仁科らの考え方に同調していたと思われる。

§4 長岡・皆川の前爆構想検討

前章に述べた長岡・皆川の前爆構想は、臨界性を問題にせずに ^{235}U と ^{238}U との混合体である核爆薬：中性子増倍媒質に強力なる「中性子源（(5)式のS）」を併設する方法で、高速中性子利用により短時間にTNT20ktonの爆発威力に相当する(4)式のN個の全中性子数を発生する体系を作るという概念である。「中性子源」は長岡論文によると“その装置をカドミウム（Cd）パラフィン若くは硼素化合物の如きもので包めば、中性子の脱散

を防ぐことが可能であるから、爆発せしむるときその封包を破れば中性子は逸散する”作用を持っている。原爆で連鎖反応を急速に起こさせるためには効果があると思える瞬間に、核爆薬に中性子を注入して反応を開始させる事が必要であるので、これは十分に考えられた構想である。α粒子は紙一枚でも透過を阻止する事が出来るので、中性子発生の必要のない時はα-emitter と Be を別々に薄い隔壁で隔離させておき、連鎖反応を起こさせたい瞬間に薄い隔壁を破断すれば、原爆を効果的に作動させる事が出来る。

広島型原爆との相違は、強力「中性子源」の併設と中性子増倍媒質は 50%²³⁵U濃縮度が限度と考えたという2点である。以下に、この2点の問題を検討する。先ず、前者の問題について、長岡・皆川の構想では中性子増倍媒質の臨界性に言及していないので、この体系の臨界状態のK値は1を超える場合から1以下の状態までの広い範囲について検討する事にする。

4.1 K > 1 (超臨界状態) の場合

最初に、超臨界状態の場合を考察する。これは広島型原爆と同じであるから、その特性を特定して、それが強力「中性子源」の併設によって如何に変わるかを検討する。所が、検討に必要な広島型原爆の詳細な特性は現実には公表されていない。そこで、ここでの評価方法は付録Aに説明を与えた Adler-Halban の連鎖反応の物理的解釈を基にする⁽²¹⁾。更に、臨界計算は中性子エネルギーを1組に縮約した1組近似の拡散方程式を用い、付録Bに説明したように、実測値に一致するように拡散方程式に用いられる核定数を決定する簡便な方法で広島型原爆の必要な特性を求める。不完全な情報源であるが、R. Serber⁽²²⁾、J. Rotblat⁽²³⁾、L. W. McNaught⁽²⁴⁾の著書に掲載されているU原爆の諸特性に関する数値をまとめて、表2に示した。表中のnは連鎖反応におけるサイクル数である。

表2 U原爆の諸特性

発表者	Serber	Rotblat	McNaught	計算値
K	2	--	2	1.18
n	80	56	80	333
消費量:	1kg	1.25kg	1kg	1kg
原子核数	5×10^{25} 個	3.2×10^{24} 個	--	2.5×10^{24} 個
反応時間	0.8×10^{-6} 秒	0.56×10^{-6} 秒	10^{-6} 秒	2.7×10^{-6} 秒
臨界量:				
無反射体	60kg	49kg	--	48.8kg
U反射体	15kg	18kg	15kg	15kg
装填量	臨界量の2倍	--	25kg	25kg

この検討で最初に注目するのは、原爆の核爆発で連鎖反応が継続している反応時間である。表2の値は爆発後に推定した爆発エネルギー値から逆算した結果である。この方法以外に、発生核分裂エネルギーによって核爆薬体が膨張し低密度になり超臨界値から未臨界値に低下するまでの時間を動力学的に計算する方法も発表されている。Serberの著書にも紹介されているが、具体的に数値を発表しているのは、全米科学アカデミー第3報告の 0.3×10^{-6} 秒である⁽²⁵⁾。以上のように、表2の値を含めて一般に言われているように反

応時間は 10^{-6} 秒と考えてよい。

更に、基本量としてサイクル時間： λ の値を検討する。ここでは、付録Bに計算値として (B-4)式の $\lambda = 8 \times 10^{-9}$ 秒を与えた。上の表に引用した殆どの文献にも $\lambda = 10^{-8}$ 秒を示しているの、(B-4)式の値は妥当である。この検討では臨界量と核爆薬装填量の情報が必要である。無反射体の²³⁵U金属球 Godiva の実測値：93.9%濃縮度, 密度 18.75g/cc, 臨界質量 48.8kg の値が得られているが、反射体付きのデータは G. A. Graves, H. C. Paxton の Oralloy 測定値がある⁽²⁶⁾。実際の核爆薬は必ず鉄製容器に収められている筈である。従って、この場合は反射体はFeになる。Fe以外に²³⁸UとBeのデータに興味がある。そこで、Be、²³⁸U、Fe反射体付きの値を Oralloy 測定値から次頁の表3に掲載した。

表3 反射体付きの臨界質量値 (unit:kg)

反射体	厚さ:1 inch	2 inch	4 inch	20 cm	無限大
Be	29.2	20.8	14.1	--	--
²³⁸ U	30.8	23.5	18.4	16.28*	16.1
Fe	36.0	29.3	25.3	--	23.2

*の値は Topsy 体系の測定による。

広島型原爆の詳細構造は公表されていない。従って、ここでは発表されている資料から推測する事にする。Rotblat は表3のデータを検討したと思われ、「表でわかるように、ベリリウムの方がウランよりも すぐれた反射体であるが、……、両方の物質を組み合わせたものが使われているようである」と書いている。臨界質量について、McNaught は「……十分な厚さの効果的な中性子反射体におおわれていたとしても、大ざっぱにいて、約15kg の²³⁵Uが必要で」と述べている。この両者の意見と表3の値を参照にして、原爆の核爆薬は4inch 厚の²³⁸UとBeの混合反射体に包まれた²³⁵U金属球で、その臨界質量を15kgとする。

反射体としてBeと²³⁸Uが優れているのは、Beの(n, 2n)反応、²³⁸Uの高速核分裂反応による。即ち、Fe反射体のように炉心(核爆薬)から逸出してくる高速中性子を散乱で単に反転させるという効果だけでなく、Beや²³⁸Uでは反射体内で中性子を増加させて炉心に戻すという付加的な効果がある。更に、続けて McNaught は「実際には、……この臨界値を かなり超えた質量を用意します。たぶん25kg 位は必要でしょう」と説明している。即ち、この25kg が原爆に必要な装填量と考えられる⁽²⁷⁾。一般的に装填量と無反射体の臨界質量との関係は、

$$\text{装填量} = \text{無反射体の臨界質量} \times \text{反射体による節約効果} \times \text{装填率} \quad (6)$$

と与えられる。この場合、反射体による節約効果は 0.31、装填率は 1.67である。Serber は表2に示したように、装填率を 2と考えている。

装填量については、約60kg という情報もある⁽²⁸⁾。Serber の装填率 2というのは最大限界値と考えねばならない。広島型原爆は砲弾方式で超臨界状態を作る。これは分離している2体の臨界体を通常の爆薬で急速に合体させるという方法である。この1体分の臨界体は僅かであっても未臨界状態でなければ味方にとっては危険である。今、装填量を60kg

とすると、分離されている1個の臨界体質量は30kgになる。表3の実測値を参照にすると、核爆薬を納めた鉄製容器の厚さは1 inchを超える事が出来ないという事になる。これは現実的ではないと考えられよう。即ち、装填量 60kg は根拠が明確ではないと考えている。

ここでは、上に説明した McNaught モデルによる装填量と臨界量を用いて、長岡・皆川の構想を評価するのに必要な原爆特性を計算する。付録BのB. 4節に計算の詳細を説明した。計算結果は表2の「計算値」という欄に示した。即ち、広島型原爆は 2.7×10^{-6} 秒の反応時間で TNT20kton の爆発エネルギーをもって爆発したと考える。そして、長岡・皆川の構想の評価は、これと同じ反応時間と爆発エネルギーを持つ原爆が構想による信管：(5)式の強力「中性子源」の使用によって、どの程度装填量が節約出来るかという問題に帰着する。詳細な計算は付録BのB. 4節に述べたが、ここでは簡単に述べる。連鎖反応の任意の1サイクルで、「中性子源」から核爆薬に注入される中性子数：s は(B-4)式によって、

$$s = 1.04 \times 10^2 \text{ 個} \quad (7)$$

となる((B-13)式)ので、この分による中性子で²³⁵Uは核分裂してエネルギーを発生する。従って、核爆薬自体の連鎖反応による発生中性子量は N/s だけで十分である。これは核爆薬の持つK値を前より低下させる。低いK値は装填量の減少になる。計算の結果、前の必要装填量 25kg は 23.83kg になる。これは、

$$\text{僅か } 4.7\% \text{ の節約} \quad (8)$$

である。結論としては、長岡・皆川の構想の強力「中性子源」は殆ど使用する意義はなかったと考えてよい。

4.2 $K \leq 1$ (超臨界状態以下) の場合

核爆薬の装填量を更に減少させて、臨界質量になった場合： $K = 1$ の時には、付録Aの(A-3)式によって、²³⁵Uの核分裂量： N' は同じ反応時間内で、

$$N' = 3.5 \times 10^4 \text{ 個} \quad (9)$$

となる。ここで、表2から $n = 333$ を用いた。この値を(4)式と比較すると、全く広島型原爆の核分裂中性子量には及ばない事が分かる。

更に、装填量を減少させて、 $K < 1$ の場合は付録Aの(A-6)式と現実の中性子増倍媒質系の製作の制限条件によって、 $\Delta k = 0.01$ が限度とすると、(A-4)式によって²³⁵Uの核分裂量： N'' は同じ反応時間内で、

$$N'' = 1.0 \times 10^4 \text{ 個} \quad (10)$$

となる。これも(9)式と同様に広島型原爆の核分裂中性子量に全く及ばない。

4.3 長岡・皆川の構想における²³⁵U濃縮度の問題

広島型原爆は²³⁵U濃縮度は94%という高濃縮の核爆薬であった。一方、長岡・皆川の構想では最高で50%濃縮度を考えていたようなので、濃縮度による原爆の特性への影響を考察する。考察すべきは次の2点である。

- 装填量の重量性
- ²³⁵Uからの自発核分裂中性子の問題

前者は Paxton-Pruvost の無反射体の球形臨界質量⁽²⁰⁾ から判断した。後者は付録Cの²³⁵Uと²³⁸Uの単位重量当たりの自発核分裂中性子値を各々の濃縮度に応じた各組成量に乗じた値である。濃縮度について各々の値を表4に掲載する。

表 4 濃縮度について臨界質量と自発核分裂中性子数

濃縮度(%)	臨界質量(kg)	倍率	自発核分裂中性子数(n/s)
10	3740	76.6	4.48×10^4
20	705	14.4	7.54×10^3
30	350	7.17	3.29×10^3
50	146	3.0	9.90×10^2
93.9	48.8	1.0	1.78×10^2

(6)式によると、装填量は無反射体の臨界質量の 0.52倍であるから、長岡・皆川の構想で最高 50%濃縮度では上の表から約 76kg になろう。しかし、広島型原爆の約 3倍である。

自発核分裂中性子の核爆薬に対する作用は「中性子源」とは本質的に異なる。原爆では超臨界状態になった時点で、中性子源からの中性子が照射され連鎖反応が開始されなければならない。一方、自発核分裂中性子は核爆薬自体から発生しているの、核爆薬を常時照射するという厄介な存在である。現実には連鎖反応系は必ず未臨界状態から超臨界状態に推移して行くようになっている（これは本来の状況で原爆も例外ではない）。もし、原爆で低いK値の状態の時に連鎖反応が起こってしまうと、発生した核分裂エネルギーによって核爆薬本体が膨張し崩れてK値が更に低下して爆発に必要な所定の核分裂エネルギーが原爆内に集積する事が出来なくなる。これが不発弾：fizzle の状態である。Pu 原爆の場合は特に ^{240}Pu からの自発核分裂中性子が深刻な問題である。J. C. Mark によると、核兵器に使用される Pu 核爆薬に含まれる ^{240}Pu の組成は 5.8%以下が必須の条件であるとしている⁽²⁹⁾。Pu 原爆の装填量を 10kg とすると、自発核分裂中性子数は 付録C の値から 5.75×10^5 n/s と計算される。U 原爆では 2 体の U 爆薬臨界体を通常の爆薬で合体させる砲弾型で合体速度は 3×10^4 cm/s である。Pu 原爆で速度 3×10^5 cm/s の爆縮型を必要とするのは、自発核分裂中性子数の大きさによる⁽²⁹⁾。表 4 の ^{235}U と ^{238}U の混合体系の自発核分裂中性子数は無反射体の場合であるから、装填量への因子 0.52倍を考慮して Pu 原爆の 5.75×10^5 n/s を比較すると、全ての場合で低い値になる。従って、低濃縮度の U 原爆は Pu 原爆のような爆縮型を必要とはしないであろう。1943年4月の Serber の原爆用の教科書には⁽²²⁾、 ^{240}Pu の問題は取り上げられていないが、自発核分裂中性子については ^{238}U 反射体の使用の場合にのみ問題にしている。米国の広島型原爆で濃縮度を94%とした理由は明確ではないが、多分、重量性からの決定であったのであろう。これらの事実から、米国では低濃縮度の核爆薬は初めから多分考えられていなかったと推察される。

4.4 長岡・皆川の前爆構想の結論

長岡・皆川の前爆構想は広島市に投下された米国開発の前爆と同じ高速中性子利用であるが、核爆薬に信管：強力「中性子源」を併設して所定の核爆発エネルギーを得ようとする概念であった。しかし、この構想は広島型前爆の特性と比較すると、全くと言ってもよい程効果はなく、長岡の論文の最後に強調されている“信管を製作するが、先決問題であります。これが不可能ならば先の見透しはつきませぬ”の意見は前爆開発には全く無意味であったと思われる。

§ 5 長岡・皆川の原子動力源構想

5.1 加速器原子炉との相似性

長岡論文は原子力の動力源への利用について次のように述べている。“若し話を転じて動力の源として原子核のエネルギーを使用し得るやを論ずれば、その用途は多々あるべきを悟る。一例を申せば大なる蒸気汽罐内で分裂を行い、石炭を焚くことを全廃する可能性がある。この場合には蒸気汽罐と信管とは固定して据え付けねばならぬ故、数百噸の信管を備えても差支ない。従って信管にはサイクロトロンを改作簡単化し規定の速度を中性子に与え得る。若しウランを利用すれば(235)に限らず、多量にある(238)も用立つから便利で有効である”。そして、この場合の“信管”のサイクロトロンで用いられる核反応は“中性子を発散せしむるには、重水素原子を互に衝突せしめても可能である(D-D)。或はリチウムと重水素でも行はれる(Li-D)”と述べられている。従って、提案されている長岡・皆川の構想の動力への応用は、約60年後の現在、日本を含む各国で研究されている加速器原子炉(加速器駆動炉)の概念と全く同じである。

ここで、指摘したい点は、長岡論文の最後に強調されている“信管を製作するが、先決問題であります。これが不可能ならば先の見透しはつきませぬ”の意見が加速器原子炉の現在の研究・開発には生きていう事実である。長岡はサイクロトロン加速器を“信管”としたが、戦後は加速器も発達し強力「中性子源」としては「陽子線形加速器」からの1GeVに加速された300mAの陽子ビームを標的である重い原子核に当てて、標的原子核を核破砕して多くの中性を発生させるという方法が開発された。発生した中性子は ^{235}U と ^{238}U の混合体系に入射して、ここで倍增されて核分裂反応により混合体系が熱源となる。この点から正に長岡・皆川の構想を源流にしていると言える。そして、中性子倍增混合体系は未臨界状態であり、それは熱中性子利用でも高速中性子利用でもよい。この加速器原子炉の最大の特徴は、通常原子力発電所に想定されている方が一の反応度事故が絶対に起こらないという点にある。それは倍增体系が常に未臨界状態である点から来ている。現在、加速器原子炉は開発・研究中であり、将来の実用発電源としては未だ多くの課題を背負っている。付録Dに参考用に問題点を説明した。

5.2 その他の動力源への応用

彼らは構想の適用例として原子力潜水艦に言及し、現在も利点として考えられている種々の理由をも推定している。“例えば潜水艦の潜行に電池を用いず、原子核のエネルギーを利用する計画をなされぬでもない。蒸気タービンを原子核のエネルギーによって回転させる方針も考えられる。……、汽罐には分裂した原子の破片が残滓として堆積するから、その除去方法も講じなければならぬが、ジーゼルエンジンと電池とは取外される美点がある。……、たゞこの方法によれば速度が従来より頗る増加し、敵艦を追跡するに有利になるかも知れない。又水上航走と水中航走とに別々の機械を使用し二重な推進を行ふことは止めらるるから、艦内には余裕を生じ、魚雷その他も沢山積載する利便がある”。現在、原子力潜水艦は多くの国で実現したが、それは長岡・皆川の原子動力源構想とは異なり、熱中性子利用の自立した連鎖反応(強力「中性子源」を必要としない)を基にした高濃縮度核燃料の軽水減速炉を動力源としている。

更に、原子力航空機への応用も述べている。“飛行家は核分裂によるエンジンを期待さ

れている。成程数字から見ると、ガソリンを使用せず遠方まで少量の原子を消費して飛行し得るようであるが、……。又長時間の飛行には、絶えず分裂を起さなければならぬ故、適応する中性子を送る装置を設けねばならぬ。これは信管と同種類のものでまだ解決していない”。長岡も開発には消極的であったが、戦後は自立した連鎖反応を基にした原子力航空機への開発・研究は米国で進められた。しかし、乗員や地上の人や物への放射線遮蔽の重い重量の点が解決出来ずに中止された。そこで得られた技術や知識は放射線遮蔽が重要でない宇宙ロケットの開発に向けられた。しかし、これも開発半ばにして計画は放棄された。

§ 6 長岡論文にある通常火薬との混合問題

戦時中、原子力の問題を研究し軍部との関わりがあった研究者は、彼らの関わり方が僅かであっても核爆薬と通常火薬との関連について言及している。むしろ、軍へのPRとして核爆薬と通常火薬との混合問題を取り上げたのではないと思われる。長岡論文も軍関係者が読むと考えられる雑誌への投稿であるから通常火薬との混合を問題にしたのは当然の考えであろう。それは“軍事専門家は一笑に付せらるるかも知れないが、原子分裂を利用するに、従来火薬を無視することは不得策であることを指摘したに過ぎない”と書いて、彼の構想を展開している。

核分裂が発見された直後に、この問題に関連した論文が米国の E. Feenberg と仏国の P. Fafre, C. Magnan, H. Muraour によって発表されている⁽³⁰⁾。これは酸化Uと沃化窒素の混合物に熱中性子を照射した結果、核分裂生成物の沃化窒素による減速で発生したエネルギーが部分的な加熱を引き起こし爆発が起こったという報告である。この論文に対して、皆川・玉木は「然し乍ら之は α -粒子等に依っても同様な事が行われるので、local heating と考えれば別に驚くべき事ではない」と述べている⁽³¹⁾。この皆川の知識は長岡論文の内容に反映されている。これは“敢て愚見として一案を披露すれば、従来使用せる火薬と分裂せる原子群とを併用する方法である。假に前に説いた信管が簡単な形で成功したとして、これを装備した分裂すべき原子群を、火薬で充たせる爆弾の中心部に納め、火薬には信管（注：これは通常の爆弾着火用の普通の信管である）を付せず、大砲若くは或る他の機械により打出し、目的物に衝突し、原子分裂が行はれたとすれば分裂によつて生ずる高熱は、火薬をも爆発し、火薬の生ずるガスを激しく熱して著き高圧を与へるにより普通の爆撃に於けるより、幾倍かの破壊区域に拡大して、弾の周辺を破砕するであろうから、その威力の顕著なるを云ふを俟たず、かくして先に論ずる過不及の調節も、単に原子群のみを打込む場合に比し、一段の好成績を挙げると考へる”と云う長岡の文章に表れている。更に、彼は“論者は或は曰はん；分裂すべき原子を一塊となさず、火薬中に平等に混和すれば更に効果を著くするであらうと、これ一理あるやうであるが、原子エネルギーは火薬に比し甚大であるけれども、かくすれば原子の分布は疎散する。信管の発する中性子は、ウラン原子の各々に当たる能はず、原子を悉皆分裂するに至らない。従つて折角の原料を可なり棄てることになるから、不成績に終るだらう”と述べているので、この混合問題は必ずしも得策であるか否かと疑いを持っていたようである。

このような混合問題を軍部に対して当時の核物理研究者が説明した例として、昭和16年

5月23日に平塚にあった第二海軍火薬廠で、京都帝国大学の萩原篤太郎が「超爆裂性原子U235ニ就テ」という講演を行った記録がある。この際、萩原は「又此ノ核分裂現象ヲ利用シテ、《ウラン》ヲ沃度等ノ窒化物ニ混合シテ、之ヲ中性子照射ニヨツテ爆裂サセル研究モ一昨年米国ヤ佛国ニアツタノデアリマスガ、ソノ後ノ経過ハ不明デアリマス」と述べている⁽³¹⁾。これは Feenberg と Fafre 等の研究を指している。もう一つの例は、昭和19年11月17日に東京第二陸軍造兵廠の信氏中将が理研の仁科芳雄を訪問して原子力開発の現状を質問した際の間答の中にある⁽³²⁾。原爆の動作原理についての仁科の説明で臨界量（この場合、10kg：《一〇K》）を基として、この臨界状態になった基本臨界量から発生した中性子によって、基本臨界量に付加する10kg：《一〇K》が核分裂して爆発エネルギーになると述べた。これについて、「問：Uハ基ニナルモノニシテ一〇Kヲ必要トスルモ爆薬トスル場合ハコノ一〇K（注：付加量）ニ代ッテ一般ノ爆薬ヲ用ヒテハ駄目カ。 答：夫ハ駄目ダ小量ノUデハ連鎖反応ガ止ンデ了フ即チ中性子ハ235Uニ当ラナケレバ他ヘ逃ゲテシマウノデアル」とある。東京第二陸軍造兵廠の職員は第二海軍火薬廠の萩原講演を聴講しているので、この問題に関して信氏中将は職員からの報告を聞いて知識は持っていた⁽³²⁾。そこで、上のような質問になったと思われる。仁科は長岡と異なり、核爆薬と通常火薬との混合体の利点を明確に否定していると理解してよいと思う。

§ 7 おわりに

『軍事と技術』掲載の長岡論文は、当時、日本の巷に広がっていた安易な原爆開発待望論を戒めるという動機で発表された。自己の構想を公表する理由として種々の事実を挙げているが、特に“……又議院に於てまで宣伝せられ、……”と述べている部分に注目したい。昭和19年2月7日の貴族院議会で長岡議員は田中館議員の原爆開発推進論の発言を聞いた。その事実が彼の論文中の上の“……又議院に於てまで宣伝せられ、……”であろう。§ 1章に述べたように、長岡と田中館とは研究者として同じ道を歩んで来た。長岡は自分に深く関係している原子力研究分野での、自分より研究能力が劣っていると考えていた田中館の公式の場面での開発推進論の発言に不快感を抱いた。それが一つの動機になって原爆開発不可能論の論文を執筆する事になった事は長岡の当時の日記より明らかである。しかしながら、世間は田中館の原爆開発推進論の方に好意的であった。一例として、1990年10月18日発行の木村一治の著作には「田中館愛橋先生は帝国議会で〈マッチ箱ぐらいの原子爆弾は東京全体を焼き払うことができる〉と証言した」と書いている⁽³³⁾。これと同様の事は20世紀終わり時点でも数多くの出版物にも見受けられる。しかも、木村の本は1993年に英訳出版され、この部分は「Dr. Aikitu Tanakadate, the oldest physicist and the top elder in the Japanesescientific community, testified (it was in 1944, I remember) at the Imperial Congress that an atomic bomb the size of a matchbox could ignite all of Tokyo city.」と翻訳されている⁽³³⁾。日本では原爆は実際には開発される事はなかったが、田中館の原爆開発推進論は歴史的には長く日本人々の記憶には残り、且つ、もしかすると欧米の諸国にも広まる可能性が生まれると考えられるが、これに反して、長岡の原爆開発不可能論は歴史の流れの底に沈んで、人々から振り返られていない。この面での勝負は田中館に軍配が挙がった。

付録 A 連鎖反応の物理

A.1 基本問題

中性子連鎖反応の現象を分かりやすく説明するには、1939年 Adler-Halban が Nature 誌に発表した方法が最適であろう⁽²¹⁾。皆川・玉木の日本数学物理学会誌の解説論文にも Adler-Halban の論文が引用されているし⁽⁶⁾、又、通常の解説書にも Adler-Halban の方法が広く採用されている。そこで、ここで Adler-Halban の方法を基に長岡・皆川の構想を検討するための連鎖反応の物理を説明する。

連鎖反応という言い方は、中性子が ^{235}U に吸収されて核分裂して、中性子を放出し、その中性子が他の ^{235}U に吸収され核分裂して再び中性子を放出し、その中性子が又、他の ^{235}U に吸収され核分裂して再び中性子を放出し、……という具合に、中性子 $\rightarrow^{235}\text{U}$ 核分裂 \rightarrow 中性子 $\rightarrow^{235}\text{U}$ 核分裂 \rightarrow ……と鎖のように中性子を媒介にして核分裂反応が連続して繰り返して進行するという現象から来ている。以上は、核分裂反応をする物質として ^{235}U を例にして説明したが、 ^{239}Pu 等の核分裂性原子核の場合でも同様である。かように、連鎖反応では一定の間隔をおいて同じ現象が繰り返して起こるので、その間隔をサイクルと呼ぶ事にする。

ここで、連鎖反応の物理を具体的に説明する前に、次の2点の前提条件がある事を注意しておきたい。

[第1条件] 連鎖反応が続いている間は、その物理状態は不変である。実際は、連鎖反応を続けている体系内では核分裂性原子核が消費している筈であるが、その消費量は無視される。

[第2条件] 連鎖反応の開始は、必ず反応系の外からの中性子の注入による。但し、注入された中性子は核分裂性原子核に確実に吸収されて核分裂反応を起こさねばならない。

初めに、 ^{235}U を例にして話を進める。 ^{235}U を含む体系に[第2条件]に従う、外からの確実に核分裂をする1個の中性子が入射して、1個の ^{235}U が核分裂し幾つかの中性子が発生する。そして、次の ^{235}U に吸収される中性子の数は2個であると仮定する。これで第1番目のサイクルが終了する。従って、ここまでで、 $1 + 2 = 3$ 個の ^{235}U 原子核が消費する。第1サイクルで発生した2個の中性子の内、1個の中性子によって別の ^{235}U が核分裂して、次の別の ^{235}U に吸収される中性子の数は[第1条件]によって同様に2個であるから、第2サイクルが終了した時点では、 $1 + 2 + 4 = 7$ 個の ^{235}U 原子核が消費する。以下同様にして、第3サイクルの終了時には、 $1 + 2 + 4 + 8 = 15$ 個の ^{235}U 原子核が消費される。ここで、話を一般化する。核分裂後に次の ^{235}U に吸収される中性子の数をK個とする。そして、同時に長岡・皆川の構想に従って、各サイクル期間中に常にs個の中性子が連鎖反応系外から供給されて確実に ^{235}U を核分裂させるとすると、この連鎖反応体系内で消費される ^{235}U 原子核、即ち、 ^{235}U を核分裂させる中性子の全数：Nは次式のように表される。

$$N = s + sK + sK^2 + sK^3 + sK^4 + \dots + sK^n \dots \quad (\text{A-1})$$

ここで、nは任意のサイクル数、このKは ^{235}U が核分裂して発生する平均の中性子の数： ν とは異なり、常に $K < \nu$ である。K値の物理的定義と評価については次節に詳細に述べる事にする。更に、注意すべきは反応中はK値が常に一定に保たれねばならないとい

