

技術文化論叢

第 12 号 (2009 年)

東京工業大学技術構造分析講座

『技術文化論叢』第12号(2009年)

目次

<論文>

消えた Fermi の中性子減速特性計算式 —Fermi にも “筆の誤りあり” —
深井佑造 1

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程: 1945-1948年
栗原岳史 31

<研究ノート>

サイクロトロンを米軍が接收海中投棄した経緯と阪大には2台と記録された根拠
福井崇時 59

2008年度 博士・修士論文梗概

<博士論文梗概>

日本における電力系統技術の発展に関する研究
荒川文生 81

19世紀末ドイツの熱輻射実験の展開
—「目的」「機器」「機器構成」を介しての実験プログラムの相互交流—
小長谷大介 101

<修士論文梗概>

清末中国の近代的科学技術導入における清官僚の明治日本視察の役割
盛葉蘭 115

論 文

消えた Fermi の中性子減速特性計算式

—Fermi にも “筆の誤りあり” —

Fermi's Legacy: The Disappearance of Fermi's Concept of Neutron Slowing-down
by Protons from Current Reactor Physics Textbooks

深井佑造
FUKAI, Yuzo

1 はじめに

中性子減速理論は Fermi により初めて開発された事は周知の事実である。Fermi の減速理論は物理的に visible で原子炉物理的に明澄である。現在、世界的に殆どの原子力発電は軽水減速による動力炉である事も周知である。軽水減速とは水素と酸素による高速中性子の減速作用で、特に、水素減速は主役である。しかし、1938 年ノーベル物理学賞の対象になった研究“遅い中性子の発見”に関連し、Fermi 自ら 'be worked out exactly' と称した中性子減速特性の計算式は⁽¹⁾、現在の殆どの原子炉理論の教科書に記載されていない。従って、減速理論の成立過程で考えられた物理的意味の詳細を知る機会は著しく制限されている。ここでは、下記の点についての検討を中心として、Fermi が発表した当時の減速理論に関する論文を読み解き炉物理学上の正確な物理的意味を汲み取りたい。

- 中性子減速理論に対する実験による裏付けは、 $\langle r^2 \rangle$: 減速材中を移動する高速中性子が低速化する迄の距離、の測定による。この水素減速系での実験の理論的検証は 'be worked out exactly' と称した中性子の水素減速特性 $\langle r^2 \rangle$ の計算を用いている。
- Fermi が述べた 'persistence velocity effect' 因子から中性子輸送断面積の概念が得られるが、これは理論上想定された概念で実験の裏付けはない。特に、水素減速炉では一般に考えられているような成立性には疑問がある。

2 Fermi により提案された 2 つの減速特性式 $\langle r^2 \rangle$

無限大の減速材中に高速中性子源が置かれている。この源からエネルギー E_0 の高速中性子が発生し、その中性子は減速材原子核 (質量数: A) との衝突によって、エネルギーを失いながら減速材中を移動してゆく。原子核と多くの衝突を経験した中性子程、多くのエネルギーを失い、中性子源からの移動する距離: r は長くなる。

中性子の減速材原子核との衝突現象は全ての場合について次のように考えている。

中性子は重心系 (C 系) で等方散乱されている。

減速材中で、あるエネルギー E を持った中性子が原子核による散乱を受ける事なく媒質内を移動する確率は、 $e^{-r/\lambda}$ (ここで、 $\lambda = 1/\Sigma_s$ 、 Σ_s は媒質の中性子散乱断面積) である。そこ

で、この中性子の移動可能距離: 平均自由行程は

$$\langle r \rangle = \frac{\int_0^{\infty} r e^{-\frac{r}{\lambda}} dr}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{r}{\lambda}} dr} = \lambda \quad (1)$$

であり、中性子源から発生した高速中性子は E_0 から順次 $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n$ とエネルギーを低下させながら、図 1 のように移動するので、中性子源からの全移動距離: r は

$$r = \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n \quad (2)$$

の各平均自由行程のベクトルの和として表される。ここで、 n は衝突の全回数である。

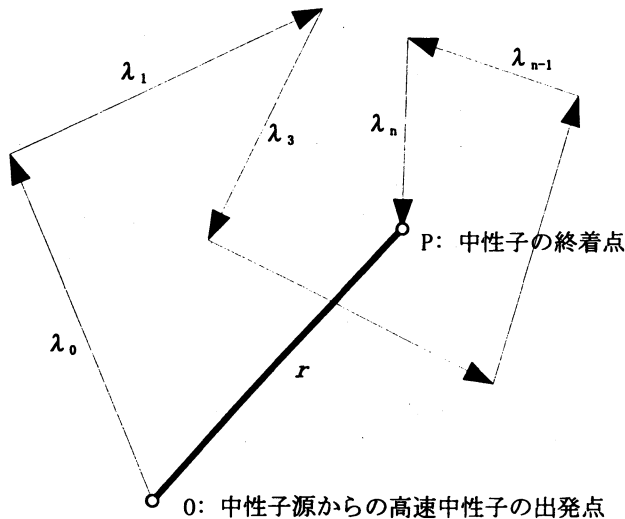


図 1 中性子移動のスキーム

図 1 は、Fermi が $\langle r^2 \rangle$ 計算の説明に用いた中性子の移動スキームで、その各平均自由行程のベクトルの相互の角度は付録 A に示した実験室系 (L 系) での散乱角: ψ である。かような中性子の移動で、中性子エネルギーは順次低下するので、一般に、散乱断面積は大きくなって行く。従って、(1) 式から各平均自由行程のベクトルの絶対値は

$$\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_i > \dots > \lambda_n \quad (3)$$

であると考えられる。しかし、減速材原子核の散乱断面積は核種によってエネルギー範囲は異なるが、一般に、

$$\lambda_i = \text{一定値} \quad (4)$$

を示すエネルギー領域がある事に注意したい。又、中性子源からの発生高速中性子: E_0 は MeV で、この値から移動して行く中性子のエネルギー低下は極めて大きく、最終エネルギー値は eV 以下にもなるので、移動中性子のエネルギー変化を lethargy: u で表す方が便利である。ここで、

$$u = \log \frac{E}{E_0} \quad (5)$$

である。そこで、以降では $\lambda_i(E)$ は $\lambda_i(u)$ と書かれる。

Fermi は中性子の減速特性を理論的に表すために、(2) 式の移動距離を二乗して平均した式を提案して、E. Amaldi との中性子共同実験結果⁽⁹⁾ の解析に用い、その測定法と結果に物理的意味を与えた⁽¹⁾。即ち、(2) 式より

$$r^2 = \left[\sum_{i=0}^n \lambda_i(u) \right]^2 = \sum_{i=0}^n \lambda_i(u)^2 + 2 \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i(u) \sum_{j=i+1}^n \lambda_j(u) \quad (6)$$

が得られる。中性子の移動距離の二乗値の空間についての平均化は(1)式と同様に、

$$\langle r^2 \rangle = \frac{\int_0^\infty r^2 e^{-\frac{r}{\lambda}} dr}{\int_0^\infty e^{-\frac{r}{\lambda}} dr} = 2\lambda^2 \quad (7)$$

となるので、(6) 式は次のような u の関数式になる。

$$\frac{\langle r^2 \rangle}{2} = \sum_{i=0}^n \lambda_i(u)^2 + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \lambda_i(u) \cdot \lambda_j(u) \cos[\angle \lambda_i(u) \lambda_j(u)] \quad (8)$$

ここで、

$$\lambda_i(u) \cdot \lambda_j(u) = \lambda_i(u) \cdot \lambda_j(u) \cos[\angle \lambda_i(u) \lambda_j(u)] \quad (9)$$

で、 $\angle \lambda_i(u) \lambda_j(u)$ は $\lambda_i(u)$ と $\lambda_j(u)$ の両ベクトルが作る角度で付録 A の L 系での散乱角: ψ に関連している。

減速材中の高速中性子は減速材原子核との衝突を繰り返しながらエネルギーを失いつつ、即ち、 u を増加させながら減速材中を移動し、最終的な低いエネルギー値: u_n を持った中性子になる。それ迄の移動距離: r が平均化されて(8)式で理論的に示された。この式からの具体的な計算式は中性子と原子核との衝突特性に関連する近似法によって得られる。Fermi は衝突特性に関連する次に示す 2 件の近似法による計算式を提案した。

- (A) 水素原子核 ($A=1$) との衝突による、Fermi は 'be worked out exactly' と称している。即ち、中性子の原子核との衝突 1 回当たりに比較的大きなエネルギー変化があるので、最終値: u_n に低下する迄の中性子の衝突回数は比較的少ない。
- (B) 水素以外の原子核 ($A > 1$) との衝突による、Fermi の連続減速理論(年令理論)。即ち、中性子の原子核との衝突 1 回当たりのエネルギー変化が小さいので、最終値: u_n に低下する迄の中性子の衝突回数は可成り多い。

尚、中性子物理学で用いられる減速材特性を示す減速面積: τ は次式で示せる。

$$\tau = 6 \langle r^2 \rangle \quad (10)$$

3 Fermiにより主導された減速特性式 $\langle r^2 \rangle$ 開発の歴史

$\langle r^2 \rangle$ 減速特性式開発の経緯を参考文献欄に示した(1)~(8)の年代順に沿って述べる。

- 1936年, 初めてFermiは水素減速材中の高速中性子の減速特性式 $\langle r^2 \rangle$ を近似方式(A)により定式化に成功し, *Ricerca Scienta*に発表した⁽¹⁾. 得られた(A)式[具体的な方程式は次の第4章に示す]を用いて, Amaldiとの中性子共同実験結果⁽⁹⁾を解析した. これが1938年のノーベル物理学賞受賞の対象になった.
- 1940年9月25日, FermiはH. L. Andersonとの共著で, CP-1に関する報告: Report A-21⁽²⁾を書いている. これは, 黒鉛減速材中の高速中性子の減速特性式 $\langle r^2 \rangle$ を近似方式(B)により定式化した(B)式[具体的な方程式は次の第4章に示す]を用いてCP-1炉の減速材黒鉛の減速特性の実測値を検討した結果である. FNM II, paper no.136に再録されている当論文のAndersonの序言によると“Fermiは*Ricerca Scienta*に発表した(A)式以後は減速特性の理論的研究を行う事なく, この分野の次の研究として, この(B)式がCP-1の建設計画中に開発された”と述べている. 但し, このAndersonとの共著論文には(B)式の導出過程の記述はなく, それは1945年秋のLos Alamos大学でのFermiの講義に詳しく述べられている⁽⁵⁾. Report A-21には, CP-1炉の減速材黒鉛減速面積: τ の実測値は 342.25 cm^2 であったと報告されている. 因みに, Glasston-Edlundによると⁽¹⁰⁾, この値は 350 cm^2 である.
- 1942年3月10日, Report C-29⁽³⁾に述べているように, Fermiは「中性子の減速と拡散」に関する講義を行った. これは極めて初歩的な内容である. ここでは, 全ての原子核による中性子の減速に適用可能な計算式として, 現在の原子炉物理学の教科書等⁽¹⁰⁾に見られる(B)式を説明している. この式はFermiが後日述べる‘persistence velocity effect’: $1/(1 - \langle \mu_0 \rangle)$ 因子⁽⁸⁾を含む式で, 水素原子核による減速では, $\xi = 1, \langle \mu_0 \rangle = 2/3$ でよいと述べており, (A)式は取り上げていない. FNM IIに述べられているAndersonの当論文に対する序言によると“CP-1建設に参加した専門家でない多くの研究者のためのFermiの講義で, 出席者の物理研究者がノートに書き留めた内容をReportに纏めたので, Fermi自身は目を通していない. 従って, 完成した成果とは思っていない”.
- 1943年3月19日, Report C-530⁽⁴⁾には次のように書かれている. Fermiは6 MeV以下の中性子エネルギーに対する種々の原子核断面積を得たJ. H. Williamsの測定結果のCF-597(未入手)を見て, この結果を参照する事により重水の減速特性の評価が可能になると判断して, (B)式による重水減速材の減速性能の計算を実施し当報告書に纏めた.
- 1945年秋, Los Alamos大学でFermiはNuclear Physicsに関する講義を実施した⁽⁵⁾. この講義のIV章 The Slowing Down of Neutrons, p. 481の(3)節の‘Calculation of $\langle r^2 \rangle$ ’で減速特性計算用の(B)式の導出が可成り詳細に述べられている.
- 1946年8月, Los Alamos科学研究所の顧問としてR. E. Marshakは同研究所にて中性子減速理論を検討して纏め, *Rev. of Mod. Physics*に発表した⁽⁶⁾.

Marshak は定常状態の 1 次元減速材体系で, lethargy: u' で減速して u に達した中性子束: Ψ の振る舞いは, 以下に示す中性子輸送方程式で表されるとして検討した.

$$\lambda(u)\mu\frac{\partial\Psi}{\partial z} + \Psi(z, \mu, u) = \int_0^u du' \int d\Omega' \Psi(z, \mu', u') f(\mu_0, u - u') \quad (11)$$

ここで, $f(\mu_0, u)$ は L 系での散乱角: $\mu_0 = \cos\psi$ の偏向による中性子速度の変化の割合を示す. 又, ここでは中性子源を省略した. (11) 式を z について Fourier 変換を行い, 得られた中性子束と $f(\mu_0, u)$ を Legendre 展開して第 2 項まで採用する. その中性子束式の空間変数をべき級数展開し, 水素原子核による減速特性の第二次空間モーメントを計算すると解析的な (A) 式が得られる. $A > 1$ 原子核の減速の場合では $f(\mu_0, u)$ 式が付録 A の (A5) 式のように複雑なため, この方法では (B) 式は得られない.

付録 B に説明したように, $A > 1$ 原子核の減速の場合は (B) 近似法に相当する Fermi の年齢理論を (11) 式を用いて解いた. しかし, この近似法を水素原子核の場合に用いるには, Marshak は “中性子エネルギーが 100 keV 以上の時には $\lambda(u)$ の変化が大きいので, この近似法は用いられない. 100 keV 以下では可成り良い近似になる” と注意している. 又, 付録 B の (B14) 式に示したように, Fermi が云う “persistence velocity effect” 因子⁽¹¹⁾ を含む平均輸送自由行程: $\lambda_{tr} = \lambda_s / (1 - \langle \mu_0 \rangle)$ を導出している.

かようにして, Marshak は Fermi が物理的考察から導いた (A) と (B) 式を (11) 式の中性子輸送方程式からでも説明出来る事を証明した. 同じ頃, Marshak は GE 社で同テーマについて講演した. そして, GE 社の H. Brooks と H. Hurwitz は Marshak の講演内容を取り纏め, *Nucleonics* に公開した⁽⁷⁾.

- 1949 年 1~6 月, Fermi は Chicago 大学で Nuclear Physics についての講義を行った. これは Fermi の最後の講義であった. 内容は J. Orear, A. H. Rosenfeld, R. A. Schluter によって編集され公開された⁽⁸⁾. 講義の中で中性子減速特性は第 9 章中性子物理学 §2 中性子の減速と §3 拡散理論に述べられている. これは主に, (B) 式の導出の説明であるが, “(B) 式はそれ程正確ではない. しかし, 等質量の粒子間 (中性子と水素) の減速 [即ち, (A) 式] に対しては正確だが長たらしい式があり, 他の文献に与えられている” との記述のみがある. 拡散年齢理論は Marshak の *Nucleonics* の論文⁽⁷⁾ を引用している.

以上の Fermi により主導された中性子減速特性計算法開発の経緯を展望する. 先ず, 水素減速用の (A) 式を開発した Fermi は渡米後 Manhattan 計画に参加し, CP-1 炉建設で黒鉛減速特性計算用に (B) 式を提案した. (B) 式は (A) 式に比べ簡単な計算式であるが, 近似の程度は低い. 特に, (B) 式を水素減速計算に用いるのは問題である. 戦後, Marshak は定常状態の 1 次元中性子輸送方程式を用いて (A) と (B) 式を導出した. Marshak の論文は Fermi や以後の炉物理の研究者の中性子減速特性計算の考え方に多大の影響を与えた.

4 Fermiによる(A)と(B)式の導出

4.1 (A)の近似法による(A)式の導出

中性子ベクトル $\lambda_i(u)$ の次にベクトル $\lambda_j(u)$ が続けられるので、 λ_i を基準に採ると(8)式の $\angle\lambda_i(u)\lambda_j(u)$ はL系での散乱角: ψ に相当する。従って、(A11)式から

$$\cos[\angle\lambda_i(u)\lambda_j(u)] = e^{-\frac{(u_j-u_i)}{2}} \quad (12)$$

となり、(8)式第2項の \cos の項が(12)式で表わされる。そこで、(8)式は次のようになる。

$$\frac{\langle r^2 \rangle}{2} = \sum_{i=0}^n \lambda_i(u)^2 + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \lambda_i(u) \cdot \lambda_j(u) e^{-\frac{(u_j-u_i)}{2}} \quad (13)$$

減速材原子核の散乱断面積は中性子エネルギーの関数として表されるので、総和: \sum は lethargy: u の積分式で表すのが当然の処置である。即ち、(13)式右辺の第1項は

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i(u)^2 = \lambda(0)^2 + \int_0^{u_n} \lambda(u)^2 du + \lambda(u_n)^2 \quad (14)$$

となる。同じく第2項の i についての総和項の第1項 $i=0$ について

$$\lambda(0) \sum_{j=1}^n \lambda_j(u) e^{-\frac{u_j}{2}} = \lambda(0) \int_0^{u_n} \lambda(u) e^{-\frac{u}{2}} du + \lambda(0)\lambda(u_n) e^{-\frac{u_n}{2}} \quad (15)$$

となり、同じく総和項の最後の項 $i=n$ については次のようになる。

$$\lambda(u_n) \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j(u) e^{-\frac{(u_j-u_i)}{2}} = \lambda(u_n) \int_0^{u_n} \lambda(u) e^{-\frac{(u-u_n)}{2}} du \quad (16)$$

残りの全部の項は $\sum_{1 \leq r < s \leq n-1} \lambda_r(u) \cdot \lambda_s(u) e^{-\frac{(u_s-u_r)}{2}}$ であるが、この \sum の内、 j に関連する和の項のみを積分形に変換すると、

$$\sum_r^{n-1} \lambda_r(u) \int_{u_r}^{u_n} \lambda(u) e^{-\frac{(u-u_r)}{2}} du = \sum_r^{n-1} \lambda_r(u) \int_0^{u_n-u_r} \lambda(u_r+u') e^{-\frac{u'}{2}} du' \quad (17)$$

ここで、 $u' = u - u_r$ である。更に、(17)式の r に関する \sum について $u_r = x$ と置き、 \sum の式を積分形に変換すると、(17)式は次のようになる。

$$\int_0^{u_n} \lambda(x) dx \int_0^{u_n-x} \lambda(x+u) e^{-\frac{u}{2}} du \quad (18)$$

(14)式から(18)式を纏めると最終的に(A)式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\langle r^2 \rangle}{2} = & \lambda(0)^2 + \lambda(u_n)^2 + \lambda(0)\lambda(u_n) e^{-\frac{u_n}{2}} + \int_0^{u_n} \lambda(u)^2 du + \lambda(0) \int_0^{u_n} \lambda(u) e^{-\frac{u}{2}} du \\ & + \lambda(u_n) \int_0^{u_n} \lambda(u) e^{-\frac{(u-u_n)}{2}} du + \int_0^n \lambda(x) dx \int_0^{u_n-x} \lambda(x+u) e^{-\frac{u}{2}} du \quad (A) \end{aligned}$$

4.2 (B) の近似法による (B) 式の導出

この場合は、先ず、(8) 式の第 2 項の i に関する総和: \sum の $i = i$ の項を書くと、

$$\lambda_i(u) \sum_{j=i+1}^n \lambda_j(u) \cos(\angle \lambda_i \lambda_j) = \lambda_i(u) [\lambda_{j+1}(u) \cos(\angle \lambda_i \lambda_{j+1}) + \lambda_{j+2}(u) \cos(\angle \lambda_i \lambda_{j+2}) + \dots + \lambda_n(u) \cos(\angle \lambda_i \lambda_n)] \quad (19)$$

となる。上式の大括弧 [] 内の \cos 値の一般式: $\cos(\angle \lambda_r \lambda_s)$ の平均値は (3) 式に示したような正確な事実に目を瞑り、付録 C の次のような近似条件: (C14) 式

$$\lambda_0(u) \equiv \lambda_1(u) \equiv \lambda_2(u) \equiv \dots \equiv \lambda_i(u) \equiv \dots \equiv \lambda_n(u) \equiv \text{一定} \quad (20)$$

を用いて計算すると、付録 C の (C15) 式に示した次の近似式で与えられる。

$$\langle \cos(\angle \lambda_r \lambda_s) \rangle = \prod_r^{s-1} \langle \cos(\angle \lambda_i \lambda_{j+1}) \rangle \quad (21)$$

一方、ベクトル $\lambda_i(u)$ と $\lambda_{i+1}(u)$ の作る角度: $\angle \lambda_i \lambda_{j+1}$ は L 系での散乱角: ψ であり、付録 A の説明のように $\cos \psi$ の平均値は (A9c) 式で与えられる。そこで、(21) 式から

$$\langle \cos(\angle \lambda_r \lambda_s) \rangle = \langle \mu_0 \rangle^{(s-r)} \quad (22)$$

が得られる。従って、(19) 式は次のように書ける。

$$\lambda_i(u) \sum_{j=i+1}^n \lambda_j(u) \cos(\angle \lambda_i \lambda_j) = \lambda_i(u) [\lambda_{j+1}(u) \langle \mu_0 \rangle + \lambda_{j+2}(u) \langle \mu_0 \rangle^2 + \lambda_{j+3}(u) \langle \mu_0 \rangle^3 + \dots + \lambda_n(u) \langle \mu_0 \rangle^{(n-i)}] \quad (23)$$

ここで、更に、次のような近似条件を追加して計算する。

(B i) 減速材原子核の散乱断面積は中性子エネルギーの変化について緩やかに応ずる。これは事実であり、その一部は (4) 式に示されている。従って、(20) 式の近似条件の

$$\lambda_i(u) \equiv \lambda_{i+1}(u) \quad (24)$$

は採用可能である。即ち、この条件は少なくとも隣り合ったベクトル λ_i と λ_{i+1} の間では十分に正しい。

(B ii) 遠く離れた 2 つのベクトル λ_i と λ_n 間では (24) 式のような近似は無理であるが、(B) 条件の水素以外の原子核の場合には、(A9c) 式に示すように $\langle \mu_0 \rangle \ll 1$ であるから (23) 式の最終項に近い項の寄与は全体総和に対しては充分に小さくなる。この事実から (23) 式の級数は無限に続いていると考えても最終結果に与える影響は極めて小さくなる。即ち、(23) 式の右辺は近似的に

$$\lambda_i(u)^2 [\langle \mu_0 \rangle + \langle \mu_0 \rangle^2 + \langle \mu_0 \rangle^3 + \dots + \langle \mu_0 \rangle^{n-i} + \dots] \quad (25)$$

と置く事が出来る。減速されて標的の原子核との熱平衡に近付くと一部の中性子は原子核との衝突で、その状態の原子核のエネルギーよりも中性子が高い場合には衝突によってエネルギーが低下して、原子核の方がエネルギーが高くなると考えられる。再び、この低エネルギーの中性子が、エネルギーが高い原子核との衝突する場合は、逆に、中性子が原子核からエネルギーを得て高エネルギーの中性子になる可能性がある。この現象を‘中性子の scatter up’ と云う。

上記の級数が無限に続く と云う仮定は、物理的には ‘scatter up’ 現象が考えられる低速の中性子の状態に迄の中性子減速特性を考えると理論的には合理性を持つ。Fermi は詳細な説明を与えていないが、‘persistence velocity effect’ 因子とは多分、この仮定の取り扱いの物理的内容を指していると推測出来る⁽¹¹⁾。

最終的に、(23) 式は次のようになる。

$$\lambda_i(u) \sum_{j=i+1}^n \lambda_j(u) \cos(\angle \lambda_i \lambda_j) = \frac{\lambda_i(u)^2 \langle \mu_0 \rangle}{1 - \langle \mu_0 \rangle} \quad (26)$$

(19) 式と (26) 式を組み合わせると、(8) 式は次のようになる。

$$\frac{\langle r^2 \rangle}{2} = \sum_{i=0}^n \lambda_i(u)^2 + \frac{\langle \mu_0 \rangle}{1 - \langle \mu_0 \rangle} \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i(u)^2 = \frac{1}{1 - \langle \mu_0 \rangle} \sum_{i=0}^n \lambda_i(u)^2 \quad (27)$$

中性子エネルギーの低下: u が 0 から u_n 迄の増加に依存する減速材原子核の散乱断面積の連続的変化が考えられ、それが (2) 式に示すように (27) 式の総和 \sum の $\lambda_i(u)$ の各項が対応しているので、付録 A の (A8c) 式で表される ξ を用いると、その各項は du/ξ に対応していると考えられる。従って、(27) 式の総和 \sum は次のような積分型の (B) 式に書ける。

$$\frac{\langle r^2 \rangle}{2} = \frac{1}{\xi(1 - \langle \mu_0 \rangle)} \int_0^{u_n} \lambda(u)^2 du \quad (B)$$

積分式上限値: u_n を無限大値でなく有限値を採用する事は、(B ii) 近似の (25) 式からの ‘persistence velocity effect’ 因子を分母に用いる点と矛盾しているように思える。

かようにして、同じ (8) 式を基本としていても、衝突特性に関連する異なった近似法により導出された (A) 式と (B) 式は本質的に同じ結果になる筈はないと考えられる。

5 (A) 式と (B) 式との相違は？

“(A) 式 ≠ (B) 式” は方程式の形から明らかであるが、2, 3 の例で数値的に検証する。(B) 式を水素減速系 ($A=1$) に適用する場合には、 $u_0 = \infty$ として付録 A の (A13) 式から $\xi = 1$ 、(A14) 式から $\langle \mu_0 \rangle = 2/3$ を用いる。即ち、(B) 式の積分式の係数は 3 となる。

計算体系の (A) 式と (B) 式を ‘ $\langle r^2 \rangle = N^2/2$ ’ の形に変形した。ここで、 N は水素原子核の単位体積当たりの数である。数値計算での水素の散乱断面積値: $\sigma_s(u)$ は V. McLane et al の全断面積値: $\sigma_t(u)$ 値から⁽¹²⁾、 $\sigma_s(u) = \sigma_t(u) - \sigma_a(u)$ として求めた。但し、吸収値 $\sigma_a(u)$

は $1/v$ 法則に従うとして 0.025 eV の値の $\sigma_a = 0.3326b$ を用いて計算した. $u_n = 14.52$ と 19.60 の 2 例の数値計算を実行した. 中性子エネルギー範囲は前者は $1 \text{ eV} \sim 2.02 \text{ MeV}$ で, 後者は $0.0265 \text{ eV} \sim 8.64 \text{ MeV}$ に相当する. 数値計算の結果を表 1 に示す. ここで, 数値計算での台形近似の数値積分法での近似誤差率は 0.15% 程度であった. 又, 解析計算を可能にするために, Marshak は水素原子核の散乱断面積の測定値を近似化して,

$$\lambda(u) = C(1 + b e^{-au}): \quad a = 0.793, \quad b = 8.1566265 \quad (28)$$

と云う形の式を提案した⁽⁶⁾. (28) 式を用いると (A) 式と (B) 式は解析式で表される. しかし, $u \rightarrow 0$ と $u \rightarrow \infty$ での (28) 式では測定された散乱断面積値を十分に再現する事は出来ない. そこで, ここでは測定された散乱断面積値を用いて計算した値に成る可く近い計算値になるように, (28) 式の定数: C 値を $0.042(u_n = 14.52)$, $0.007(u_n = 19.60)$ と採用した. これは表 1 に括弧 () で示した数値結果になり, 表 1 の結果から,

表 1: u_n に対する ' $\langle r^2 \rangle > N^2/2$ ' の値

u_n 値	(A) 式	(B) 式	比: (A) 式/(B) 式
14.52	0.5683(0.5827)	0.4204(0.4145)	1.352(1.406)
19.60	2.938(3.119)	2.058(2.062)	1.427(1.512)

次の事が分かった. “(A) 式 \neq (B) 式” の ‘ずれ’ は約 $30\sim 50\%$ である.

6 “(A) 式 = (B) 式” が認められる条件の検討

現在の原子炉物理の教科書には, 水素減速系での中性子特性を説明している計算式には積分式の係数を 3 とした (B) 式が殆ど用いられている. 前に述べたように, Marshak も近似的には (B) 式の利用を勧めている⁽⁶⁾. そこで, 次には “(A) 式 = (B) 式” を認めても差し支えない条件を検討して見る.

(A) と (B) 式の積分内の被積分項の $\sigma_s(u)$ は u の関数であるが, (20) 式のように定数値と近似化すると積分は簡単な解析値となる. (A) と (B) 両式を ' $\langle r^2 \rangle > N^2\sigma_s^2/2$ ' の形にすると,

$$\begin{aligned} \text{(A) 式} &= 3u_n + e^{-\frac{u_n}{2}} + 2 \\ \text{(B) 式} &= \frac{3u_n}{(1 + 2e^{-u_n})[1 - (1 + u_n)e^{-u_n}]} \end{aligned}$$

となる. ここでは, (B) 式については積分項の上限値に合わせるため, ξ と $\langle \mu_0 \rangle$ には各々 (A13) と (A14) 式を用いた. 従って, 比: (A) 式/(B) 式は次のようになる.

$$\text{比} = \left(1 + \frac{e^{-\frac{u_n}{2}} + 2}{3u_n} \right) (1 + 2e^{-u_n}) (1 - (1 + u_n)e^{-u_n}) \quad (29)$$

u_n の関数として, (29) 式から “(A) 式 = (B) 式” の ‘ずれ’ を下表に%で示す.

表2: u_n に対する ' $\langle r^2 \rangle > N^2/2$ ' の近似値

u_n 値:	5	10	14.52	19.60	50	100	200	1000
'ずれ' %:	10.7	6.6	4.6	3.4	1.3	0.7	0.3	0.07

即ち, C系での等方散乱条件 ($u_n \rightarrow \infty$) と (B ii) 近似を厳密に守る場合ならば, 結果は“(A)式=(B)式”になる.

更に, (20)式のような $\sigma_s(u) =$ 定数値とする近似化から精度を上げて Marshak が提案した (28)式を用いて検討する. (B)式の積分は (A)式内の一つの項(第4項目)になっている事が直ちに理解する事が出来る. そこで, (A)式の第4項目の数値の全体に対する割合が 1/3 になっていれば, “(A)式=(B)式”になるであろう. その数値結果を表3に示す. 表中の'ずれ'は 1/3 との差である. この結果は σ_s を定数値とした近似と全く同様で, 結論として,

$u_n \rightarrow \infty$ の場合にのみ “(A)式=(B)式” になる.

と云う事である. しかし, 現実には $u_n = \infty$ はあり得ない. 核分裂スペクトルでの最高エネルギー値は 10 MeV で, これと McLane et al により水素原子核の断面積値が与えられている最低エネルギー値が 0.01 eV である事実⁽¹²⁾ から, この場合でも $u_n = 20.7$ になる. 従って, “(A)式=(B)式” を認める事の出来る場合は実際にはない.

表3: Marshak が提案式による u_n に対する ' $\langle r^2 \rangle > N^2/2$ ' の近似値

u_n 値:	5	10	14.52	19.60	50	100	200	1000
第4項の割合:	0.227	0.231	0.235	0.239	0.259	0.278	0.297	0.324
'ずれ' %:	-32.0	-30.8	-29.5	-28.2	-22.3	-16.6	-11.0	-2.95

更に, 表1と表3に示されているように, 低い u_n 値では'ずれ'は大きい. しかし, 表2では u_n 値が大きくなれば'ずれ'は許容出来る程度に小さくなる. これは, (20)式のように $\sigma_s(u) = \sigma_s$ の定数値と近似化した事に理由がある. 即ち, “(A)式=(B)式” とならない事の更なる理由の一つは,

入射中性子のエネルギーによる水素原子核の散乱断面積値の依存性にある.

と考える事が出来るのである. 第3章に述べた Marshak の注意“中性子エネルギーが 100 keV 以上の時には $\lambda(u)$ の変化が大きいので, この近似 [(A)式=(B)式] は用いられない. 100 keV 以下では可成り良い近似になる”は, この事実を説明したのである⁽⁶⁾.

7 中性子輸送断面積についての疑問

減速理論の (B)式に関連している 'persistence velocity effect' 因子を含む中性子輸送断面積を導出する計算に際して, 原子炉理論の多くの教科書は, 次の仮定を提起している.

体系内を移動する中性子の速度は一定とする. (30)

(30)式を仮定しているのは Weisskopf⁽¹³⁾ も同様で, この因子を計算している Lamarsh⁽¹⁴⁾ は

中性子の散乱角の分布が散乱媒質中の中性子の運動に及ぼす影響を考慮にいれるには、…… 衝突の結果、中性子のエネルギーが変化する事はないと仮定する

と述べている。そこで、L系での散乱角: ψ の余弦の平均値を $\langle \cos \psi \rangle$ とすると、中性子の原子核との無限回衝突で平均輸送自由行程: λ_{tr} は次のようになる。

$$\lambda_{tr} = \lambda + \lambda \langle \cos \psi \rangle + \lambda \langle \cos \psi \rangle^2 + \lambda \langle \cos \psi \rangle^3 + \dots = \frac{\lambda}{1 - \langle \cos \psi \rangle} \quad (31)$$

即ち、最初中性子は媒質中を λ 移動した後散乱されて、そこで方向を転じて $\lambda \langle \cos \psi \rangle$ 移動し再び散乱されて、出発点から $\lambda \langle \cos \psi \rangle^2$ 移動し、次の散乱まで $\lambda \langle \cos \psi \rangle^3$ 移動し、…… と無限回の衝突を繰り返す、中性子移動距離は因子 $1/(1 - \langle \cos \psi \rangle)$ だけ増加する。

Lamarsh が述べている上の仮定は次の点で正確な表現ではない。即ち、(30) 式の仮定の下での (31) 式は、付録 A の (A1) 式と (A2) 式から (v_2/v_1) を消去した ψ の式が θ と A のみの関数と見えるので、中性子は原子核との衝突によって散乱角 ψ だけで変化して媒質内を移動して行ったと云う中性子の移動状況を表現した式となる。しかし、Newton の“慣性の法則”によれば⁽¹⁵⁾、中性子の運動は何らかの力が加わらない限り等速直線であるべきで、(31) 式で示されるような現象は起こらない筈である。座標の原点を運動している中性子に設定すれば“原子核と中性子の衝突”とは中性子の運動に原子核が衝突して散乱角 ψ が生じたと考えられるので、付録 A に示したように (A4) 式を当然考慮して (31) 式が表現されていると考えるべきで‘(30) 式を仮定している’のではないのである。

又、Weinberg-Wigner でも⁽¹⁶⁾、‘中性子は全て同じ速度を持ち、全ての散乱はエネルギー変化なくして起こる’と述べ、これは

$$\text{This is the usual assumption made in dealing with thermal neutrons.} \quad (32)$$

と明言している。この Weinberg-Wigner が示した (32) 式の条件については、原子核と中性子が完全なる熱平衡の状態にある場合と考える。即ち、媒質中の任意の場所の衝突では中性子速度の低下があっても、他の場所では中性子は、より温度の高い(エネルギー)状態の原子核と中性子の衝突によって反対に中性子はエネルギーを得る事もあるので、(32) 式の仮定は媒質全体の中性子としては成立していると考えられるべきである。この問題は (Bii) 近似の際に述べた事と同様で、従って、

$$\text{熱平衡の状態の熱中性子の場合} \text{は ‘persistence velocity effect’ 因子} \quad (33)$$

は考慮され得る。しかし、‘persistence velocity effect’ 因子により定義されている熱中性子輸送断面積の式での原子核の質量数 A 値は、減速材分子を構成している化学結合効果を含んだ値と考えるべきである。この意味から軽水減速炉の熱中性子に対しては中性子輸送断面積の式は適用可能であろう。しかし、水素による減速中の高エネルギー中性子に対しての (30) 式の仮定は矛盾していると考えられる。そこで、軽水減速炉では高速中性子に対する輸送断面積自体が論理的に考えられるか否かについては、付録 B の B5 章に説明したように疑問が生ずる。

8 Fermi 没後の水素減速理論の進展は？ (A) 式の運命

第5と第6章に述べたように、水素減速の場合は“(A)式=(B)式”はあり得ない。そして、第3章に述べたように、Fermi自身が‘be worked out exactly’と称していた(A)式は、1945年秋のLos Alamos大学での講義で示した後は、1949年1~6月のChicago大学での講義で“正確だが長ったらしい式”と云っただけで具体的な式を全く記載していない。むしろ、Fermiは“それ程正確ではない”と知った上で(B)式を受け容れていた様である。

第3章に述べた減速特性式開発の歴史の続きとして、更に、中性子減速理論に関連する原子炉理論や中性子物理の研究分野でのFermiの開発した減速特性式の、その後の発展状況を調査した。この調査に関連する教科書と重要な論文等を年代順に下記に示した。

- 1946年10月、MITでのセミナー、Friedman; Elementary Pile Theory⁽¹³⁾.
- 1946年10月-1947年7月、Oak Ridge 国立研究所でのセミナー、Soodak-Campbell; Elementary Pile Theory⁽¹⁷⁾.
- 1952年発刊、Glasston-Edlund; the Elements of Nuclear Reactor Theory⁽¹⁰⁾.
- 1953年発刊、Hughes; Pile Neutron Research⁽¹⁸⁾.
- 1954年発刊、Murray; Introduction to Nuclear Engineering⁽¹⁹⁾.
- 1955年以前、SelengutとGoertzelが独立に軽水減速特性計算法を私信で提案した。
- 1955年発刊、Glasston; Principles of Nuclear Reactor Engineering⁽²⁰⁾.
- 1955年発表、Hurwitz-Zweifel; J. of Appl. Phys. に軽水減速特性計算法を発表した⁽²³⁾.
- 1957年発刊、Davison; Neutron Transport Theory⁽²¹⁾. Fermiの(A)式ではない、L. V. SpencerとU. FanoのX線研究の結果を水素減速の問題に応用する事を説明している⁽²¹⁾.
- 1958年発刊、Weinberg-Wigner; the Physical Theory of Neutron Chain Reactors⁽¹⁶⁾. 減速効果のない散乱体を含む水素減速のFermiの(A)式⁽²⁴⁾とSG近似式(Selengut-Goertzel)を説明している。
- 1966年発刊、Lamarsh; Introduction to Nuclear Reactor Theory⁽¹⁴⁾.
- 1970年発刊、Bell-Glasston; Nuclear Reactor Theory⁽²²⁾.

上記の教科書等は世界の全ての原子炉理論の教科書等を網羅しているとは思っていないが、Fermiの開発した減速特性を略理解した上で中性子減速理論を記述していると考えられる。しかし、Weinberg-Wignerを除いて、これらの現在の原子炉理論の教科書の何処にも(A)式の記述はなく、中性子減速に関する解説と計算式は全てFermiの年令理論の(B)式であった。即ち、現在の教科書からノーベル物理学賞の顕彰対象になった研究内容の一部を占

めていた (A) 式は全く消えてしまっている のである。

Weinberg-Wigner の教科書 のみに、減速効果のない散乱体を含む場合の水素減速の (A) 式が紹介されている理由は、この著者達が Fermi 自身に嘗て研究遂行上で強い交流が在った事に関係した結果のように思える。Wigner と Fermi との親密な関係は有名な事実であり、Weinberg も Manhattan 計画では Fermi との幾つかの共同研究がある⁽²⁵⁾。従って、両名は原子炉物理の教科書を著述する際、内容に (A) 式を加える気持ちは大きかったと思われる。(A) 式は「水素のみ」による減速現象を対象にしているが、現実には「水素のみ」と言う体系は考え難い。そこで、Fermi は最初に (A) 式を算出した後に減速効果のない散乱体を含む場合の式も公表している⁽¹⁾。直後に、その式を利用して Columbia 大学の G. Horway は軽水の減速について酸素を単なる散乱体と仮定して計算し発表しているが⁽²⁶⁾、S. Frankel-E. Nelson, N. Nordheim-G. Nordheim-H. Soodak(何れも私信で未公表)、及び Marshak によって、この計算式は再検討された⁽⁶⁾。FNM I no.119a の脚注には “this equation is not correct, probably because of typographical mistakes” とある⁽¹⁾。勿論、Weinberg-Wigner の教科書に紹介されている Fermi の (A) 式は再検討された正しい式である⁽²⁴⁾。又、Weinberg-Wigner は、この Fermi の (A) 式は軽水と金属核燃料系の減速面積 τ の計算に利用され、その典型的な例として 1952 年 3 月 Idaho 州 Arco に稼働した材料試験炉 (MTR)⁽²⁰⁾ の炉心設計に用いられたと述べている⁽¹⁶⁾。即ち、(A) 式の算出の際の減速理論は物理的に visible で炉物理的に明澄であるが、飽くまで「水素のみ」の単独体系の減速による現象を対象にして導かれた結果で、減速効果のない散乱体や吸収体を含む場合に限って拡張が可能であった。現実の減速材は、第 2 章に説明した衝突特性に関連する (A) と (B) の近似化に伴って考察された異なった物理的機構を持つ水素 ($A=1$) と酸素 ($A>1$) の軽水のような多種類の減速混合系が多い。このような多種類の減速混合系では物理的に visible で炉物理的に明澄である論理の展開は極めて困難で、この論理構造による問題解決は多分不可能であろう。この実際的な要望により教科書から (A) 式は全く消えてしまったのである。

そこで、付録 B に説明した SG(Selengut-Goertzel) 近似式が登場して来たと考えられる。この SG 近似式の登場は正に Fermi の没した直後であった。この方法では、lethargy u' で水素 ($A=1$) と ($A>1$) 原子核に衝突散乱された中性子が同時に減速されて lethargy u に現れる現象を直接定式化している。即ち、Fermi の方法では取扱えなかった異なった物理的機構を持つ多種類の減速混合系での中性子の振舞いが表現されている。SG 近似では、付録 B の (B12a), (B12b), (B6a), (B6b) の 4 個の式は 4 個の変数: $\psi_0, \psi_1, q_{OH}, q_{IH}$ から構成されているので、lethargy u での中性子の振る舞いは原理的に解ける。実際は、中性子源と結果する中性子束は空間分布を e^{ikz} であると近似し k を与えて、lethargy u に関する取り扱いは mesh に分解した差分方程式に変換し大型計算機によって減速混合系での中性子エネルギー・スペクトラムを数値的に求める。

初期 SG 近似は年令理論で用いられている近似化を含んでいるので、Weinberg-Wigner は「最大の弱点 (the most problematical step)」を持った近似法と批判している⁽¹⁶⁾。しかし、現在は上に示したように大型計算機利用によって、この危惧は解消されていると考える。Hurwitz-Zweifel によると⁽²³⁾、1.44 eV(In 箔) までの軽水減速面積 τ の実測値は 30.5 cm^2 で、SG 近似法による計算値は 30.9 cm^2 、Weinberg-Wigner では 31 cm^2 と報告されているので⁽¹⁶⁾、何れも SG 近似は年令理論 [(B) 式による] の 17.5 cm^2 に比べて優れている。

9 おわりに

Fermi 自身は (A) 式は 'be worked out exactly' であると称しているが、(A) 式の積分式の上限值に有限値の u_n を用いている。付録 A の (A15) 式に示したように、もし、冒頭の中中性子は C 系で等方散乱されると言う条件を絶対的に守ると言う事であれば u_n 値は無限大値を採用しなければならないであろう。即ち、論理的な厳密さを要求するならば、(A) 式は 'be worked out exactly' とは云えない筈と考えられる。現在の原子炉理論の教科書のように (A) 式の代わりに (B) 式を採用する考え方は、第 5 と第 6 章に述べたように、単に無限大値に近い u_n 値を採用すると云う近似で片づけられる問題ではなく、水素原子核の散乱断面積値の高エネルギー中性子に対する依存性も関連していると考えらるべきである。Lamarsh⁽¹⁴⁾ が例示している軽水減速系の場合では、酸素原子核は水素原子核の半分の組成で、而も、減速性能 ($\xi\sigma_s$) が比較して可成り低いので、高エネルギー中性子に対する減速では水素原子核のみが優勢で、むしろ、酸素原子核は減速した中性子の移動を妨げていると Lamarsh は考えている。水素原子の密度が同じ水素媒質の τ 値の方が、軽水減速系の場合よりも 35% 以上も高くなると云う測定結果を、この効果によると解説している。これは体系の高エネルギー中性子に対する組成原子核の関連核反応の断面積値が中性子減速に可成り強く依存している事を示していると考えらる。

又、軽水減速炉では、高速中性子領域で (B) 式から来る 'persistence velocity effect' 因子を含んでいる中性子輸送断面積の式が成立すると考える事は、第 4 章に述べた結果から疑問である。更に、Weinberg-Wigner が初期 SG 近似の「最大の弱点 (the most problematical step)」と称した年令理論の近似を用いたとすれば、確かに 'persistence velocity effect' 因子を含んでいる中性子輸送断面積の式が得られるが、付録 B の B5 章に検討したように、こうした考えは大型計算機利用可能の現在では通用しないと考えるべきである。

Fermi が初めて中性子減速理論研究の対象に選んだのは「水素のみ ($A=1$)」の単独体系の減速現象で、その結果が (A) 式である。その後、($A>1$) 原子核に対する減速現象の考察から (B) 式へと発展開発した。Fermi が具体的な原子炉設計の実務に取り組んだ際に用いたのは (B) 式であった。L. Szilard の提案による非均質性炉心⁽²⁷⁾ を持った黒鉛減速の CP-1 の建設を Wigner 等と共に主務した話は有名である。そして、W. H. Zinn と共に重水減速の CP-3 の建設にも関与した⁽²⁸⁾。軽水減速系については、Fermi は 1945 年秋 Los Alamos 大学での講義で water boiler 型の 1944 年 5 月に臨界になった LOPO の構成について軽く触れている程度である⁽⁵⁾。初めて中性子減速理論研究の対象が水素減速であったにも拘わらず軽水減速炉に対しては、この程度の関心しか払っていなかった。このような態度に反して、Fermi は高速中性子については、Los Alamos 大学での講義では Fast Neutron Chain Reactions の章で⁽⁵⁾ 独特の検討により高速中性子臨界方程式を提案している。即ち、Fermi は軽水減速炉開発研究に対しては冷淡であったと思う。

Fermi は連鎖反応の平和利用としての動力炉開発についても関心を示した。1946 年 6 月に開催された The George Westinghouse Centennial Forum で "Atomic Energy for Power" と云う演題で講演をしている⁽²⁹⁾。この講演には、将来に向かった動力炉開発の問題点について当時の技術水準から見た自己の考え "炉心内構造材用の高温耐熱材料の開発が最重要課題で、その開発のため動力炉の実現は 20~30 年後になる。" と予言している。

現在の原子力発電の殆どは軽水減速の動力炉である。そこで、Fermi の没年を含めた当時の米国での軽水炉開発の年代毎の歴史を次に掲げた^{(20),(30)}。1946年10月に発足した米国原子力委員会 (USAEC) が動力炉開発の全責任を負い、初期は種々の炉型を検討した。

- 1948年, Argonne 国立研究所 (ANL) で原子力潜水艦の動力炉研究を始め, Westinghouse 社が軽水減速型の Submarine Thermal Reactor (STR) の建設を担当。
- 1953年3月, Idaho 州の国立原子炉試験場で STR は運転を開始した。USAEC は開発目標として, 加圧水型軽水減速炉 (PWR) の Shippingport 動力炉を選定。
- 1953年7月, STR は発電に成功し動力炉としての可能性試験に成功。
- 1954年11月28日, Fermi 没す。享年 53 歳であった。
- 1955年4月, Shippingport 動力炉の建設が着手された。
- 1957年12月2日, Shippingport 動力炉が臨界になり, 27日, 電気出力 60MW で運開。

上記のように, 1946年に Fermi は原子力による発電は 1970~80年頃と予言をしていた。彼の予言の基礎になった関連分野の当時の技術水準に発電用蒸気タービンの開発状況がある。この時期には, 蒸気タービンの熱効率向上の技術努力があり⁽³¹⁾, 入口蒸気条件が飽和蒸気から超臨界圧: 1945年; 165気圧, 510°C ⇒ 1953年; 165気圧, 566°C ⇒ 1958年; 352気圧, 649°C へと上昇した。こうした状況を受けて後述する 'Daniels Experimental Power Pile' の計画で⁽³²⁾, この時点での炉心冷却材出口温度の実績は 200 °C 以下であるが「Daniels Pile の概念設計では 500 °C 以上とする」と云う記録がある。炉心冷却材の原子炉出口温度の高温化の必要性は Fermi を含めた冶金研究所所属の物理学者の間の大方の考えであった。

Fermi の予言に反して, 上の年代表に示すように, 米国での実際の歴史は予言から僅か 10年程度の後の 1957年に商業発電に成功して現在に至っている。当時の発電用蒸気タービンの開発に逆行して, Shippingport 動力炉は炉心冷却材の出口温度は 290 °C で 41 気圧, 250 °C の飽和蒸気で発電した。この程度の出口温度では炉心内構造材用の高温耐熱材料に対する開発は Fermi が危惧した程の困難さは無かったのである。そして, その炉心での連鎖反応の物理的検討は Fermi の 1938年ノーベル物理学賞の対象になった研究の (A) 式の水素による中性子減速と云う物理現象が基本となるべきであったと考えるが, 第 8 章に述べた Fermi 没後の水素減速理論の年代順の進展を参照すると, この問題は (A) 式に代わる SG 近似法と計算機技術の著しい開発によって補われたと考えられる。

最後に, 次の問題に対する多少の蛇足を述べる事を許して欲しいと思っている。全ての原子炉物理の教科書には, 減速材として軽水, 重水, ベリリウム, 黒鉛の 4 種類の材料を挙げている。しかし, ベリリウム減速系の実現性についての研究は極めて少ない。ベリリウム減速炉は未だ嘗て実現した事はないが, 1946年5月16日に Manhattan 計画内にベリリウム減速系の 'Daniels Experimental Power Pile' の建設が公式に認められ⁽³²⁾, 冶金研究所の最後の所長に就任した F. Daniels と, Wigner, C. R. McCullough (Monsanto Chemical Co. から出向), 及び, 私企業 14 社からの出向者等によって概念設計作業が進められた。しかし,

米国内での原子力開発の全ての責任と権限が Manhattan 計画から米国原子力委員会に委譲されると、この計画は原子力委員会の命令によって1947年9月16日に中止になった。即ち、ベリリウム減速炉は実現する事はなく、その後にも実現計画はない。唯、この概念設計作業によって軍の独占であった原子力技術情報が私企業からの出向者によって一般に拡散し、その後の米国全体の原子力技術水準の向上に寄与したと云われている。

付録 A: 中性子減速問題の基本概念

A1. C系での等方散乱と lethargy: u との関係

一般の原子炉理論(例えば, Glasstone-Edlund⁽¹⁰⁾等)では, 減速特性をC系の散乱角: θ の関数として求めているが, Fermi⁽¹⁾ や Marshak⁽⁶⁾ は u の関数として計算している。

最初に, この問題を原子核 ($A > 1$) による減速で考える。原子核にエネルギー E_1 を持った中性子が衝突し散乱後にエネルギーが E_2 に減速したとする。Glasstone-Edlundによると, この衝突で中性子のエネルギー変化はC系でのエネルギーと運動量の保存則から,

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \frac{(A^2 + 1 + 2A \cos \theta)}{(A + 1)} \quad (\text{A1})$$

と得られる。一方, 実験室系(L系)での散乱角: ψ はベクトル解析から次のようになる。

$$\cos \psi = \frac{v_1 (1 + A \cos \theta)}{v_2 (A + 1)} \quad (\text{A2})$$

ここで, 次のような lethargy u を用いると,

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = e^{-u}, \quad \frac{v_1}{v_2} = e^{\frac{u}{2}} \quad (\text{A3})$$

となるので, (A1)式は次式で示せる。

$$e^{-u} = 1 - \frac{2A(1 - \cos \theta)}{(A + 1)^2} \quad (\text{A4})$$

又, (A1)式からの $\cos \theta$ を (A2)式に代入して (A4)式を用いると, $\cos \psi$ は

$$\cos \psi = \frac{(A + 1)e^{-\frac{u}{2}}}{2} - \frac{(A - 1)e^{\frac{u}{2}}}{2} \quad (\text{A5})$$

となる。一方, (A4)式から次のように $d\mu/du$ 式を得る。

$$\frac{d\mu}{du} = \frac{d(\cos \theta)}{du} = \frac{-(A + 1)^2 e^{-u}}{2A} \quad (\text{A6})$$

ここで、C系で等方散乱と云う条件の下で、 $d\mu$ から du への積分変数の変更に伴う上下限値を (A4) 式によって考える。

$$\begin{array}{ccc} \text{C系で等方散乱} & & \text{lethargy での条件} \\ \theta = \pi; \mu = 1 & \rightarrow & e^{-u} = 1; u = 0 \end{array} \quad (\text{A7a})$$

$$\theta = -\pi; \mu = -1 \quad \rightarrow \quad e^{-u_0} = \left[\frac{(A-1)}{(A+1)} \right]^2 \quad (\text{A7b})$$

$$\text{即ち, } u_0 = \log \left[\frac{(A+1)}{(A-1)} \right]^2 \quad (\text{A7c})$$

A2. 原子核 ($A > 1$) による減速特性: ξ と $\langle \mu_0 \rangle$ の計算式

ξ について、 θ の関数として計算する場合は (A1) 式によって、

$$\xi = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \log \left[\frac{A^2 + 1 + 2A\mu}{(A+1)^2} \right] d\mu \quad (\text{A8a})$$

u の関数として計算する場合は (A6) 式によって、

$$\xi = \frac{(A+1)^2}{4A} \int_0^{u_0} u e^{-u} du \quad (\text{A8b})$$

となる。何れの式も計算すると、同じ次の式になる。

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2 \log \left[\frac{A-1}{A+1} \right]}{2A} \quad (\text{A8c})$$

$\langle \mu_0 \rangle$ について、 θ の関数として計算する場合は (A2) 式によって、

$$\langle \mu_0 \rangle = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \frac{1 + A\mu}{(A^2 + 1 + 2A\mu)^{\frac{1}{2}}} d\mu \quad (\text{A9a})$$

u の関数として計算する場合は (A5) 式によって、

$$\langle \mu_0 \rangle = \frac{(A+1)^2}{4A} \int_0^{u_0} e^{-u} \left[\frac{(A+1)e^{-\frac{u}{2}}}{2} - \frac{(A-1)e^{\frac{u}{2}}}{2} \right] du \quad (\text{A9b})$$

となる。何れの式も計算すると、同じ次の式になる。

$$\langle \mu_0 \rangle = \frac{2}{3A} \quad (\text{A9c})$$

以上のように、 θ の関数としても u の関数としても計算すれば、(A8c) 式と (A9c) 式に示されるように、同じ形の式が成立する事が容易に証明出来るので、次の結論が得られる。

C系での等方散乱条件と lethargy についての積分計算は全く等価である。

A3. 水素原子核 ($A = 1$) による減速特性: ξ と $\langle \mu_0 \rangle$ の計算式

次に, $A > 1$ の場合に相当する条件式の (A4) 式で $A=1$ とすれば, この関係式は

$$e^{-u} = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (\text{A10})$$

となる. 同様にして (A5) 式から $\cos \psi$ は次のようになる.

$$\cos \psi = e^{-\frac{u}{2}} \quad (\text{A11})$$

C系で等方散乱と云う条件の下で, 積分変数 u の上下限値を (A10) 式によって考えると,

<u>C系で等方散乱</u>	→	<u>lethargy での条件</u>	
$\theta = \pi; \mu = 1$		$e^{-u} = 1; u = 0$	(A12a)
$\theta = -\pi; \mu = -1$		$e^{-u_0} = 0; u_0 = \infty$	(A12b)

と得られるので, 水素原子核の減速では, 理論的に厳密に考えると, 次の結論が得られる.

C系での等方散乱条件下では u に関する式の積分式の上限値 u_0 は確定出来ない.

これは, 同質量の2粒子間の衝突では入射した中性子は陽子に, その全エネルギーを与えて自らは静止状態になると云う確率が物理的には考えられる事実に相当する.

そこで, $u_0 \neq \infty$ として 'C系での等方散乱条件は必ずしも厳密に成立していなくても良い' と云う近似化によって確定した u_0 値が得られたと仮定すると,

(A8b) 式から

$$\xi = \int_0^{u_0} u e^{-u} du = 1 - (1 + u_0) e^{-u_0} \quad (\text{A13})$$

(A9b) 式から

$$\langle \mu_0 \rangle = \int_0^{u_0} u e^{-\frac{3u}{2}} du = \frac{2}{3} (1 - e^{-\frac{3u_0}{2}}) \quad (\text{A14})$$

が得られる. $u_0 \rightarrow \infty$ とすれば, 上式は明らかに $\xi = 1$, $\langle \mu_0 \rangle = 2/3$ となる. この近似化の程度は次のように検証出来る. (A10) 式で θ が $(-\pi + \Delta\theta)$ の場合を考えて見る. 勿論, $\Delta\theta$ は極めて小さい値である. (A10) 式から,

$$2e^{-u_0} = 1 + \cos(-\pi + \Delta\theta) = 1 - \cos \Delta\theta \doteq \frac{\Delta\theta^2}{2}$$

故に, $\Delta\theta$ の近似式は次のようになる.

$$\Delta\theta = 2e^{-\frac{u_0}{2}} \quad (\text{A15})$$

例えば, $u_0 = 14.4$ とすると, $\Delta\theta = 0.0015$ になり, この値は π の 0.05% に過ぎない. 即ち, $u_0 \neq \infty$ として比較的多めの近似の確定した u_0 値が用いられていれば, 水素原子核による減速系での 'C系での等方散乱条件は必ずしも厳密に成立していなくても良い' と考えられるであろう.

A4. 減速材原子核による $u_0, \xi, \langle \mu_0 \rangle$ の値

水素: H, 重水素: D, ベリリウム: Be, 黒鉛: C の減速材の値を表 A に示す.

表 A: H, D, Be, C の減速特性値

核種	質量数	u_0	ξ	$\langle \mu_0 \rangle$	u_0/ξ
H	1	∞	1	2/3	∞
D	2	2.197	0.725	1/3	3.03
Be	9	0.446	0.207	2/27	2.16
C	12	0.334	0.158	1/18	2.12

u_0/ξ は最大のエネルギー変化値内での原子核による中性子の衝突の平均回数である.

付録 B: Marshak の方法と Selengut-Goertzel の近似法

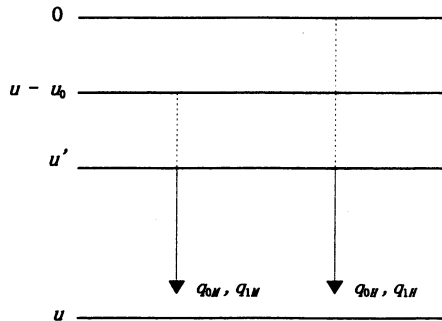
本文に述べたように, Fermi が物理的 visible な方法で (A) や (B) 式を導いた中性子減速問題を R. E. Marshak は Boltzmann の輸送方程式を用いて得た⁽⁶⁾. (A) 式を導出した Fermi の方法では水素と他の減速材からなる 2 媒質での中性子減速問題を正確に解く事は極めて困難であるが, この 2 媒質減速問題は Marshak の方法の延長で解く事が可能である. これが Selengut-Goertzel の近似法で一般に SG 近似と云われている. その概要を説明する.

B1. 基本計算式

減速問題を検討する媒質は水素 (質量数 $A=1$) と原子核 ($A > 1$) の多種類の減速材物質により均質に構成される. 前者の体積比を v_H , 後者を v_M とすると,

$$v_H + v_M = 1 \tag{B1}$$

である. この体系で lethargy u' の高速中性子が上記の減速材原子核との衝突によって減速されて lethargy u となる中性子のエネルギー平衡関係を下図に図式的に示した.



ここで,

q_{0M}, q_{1M} : 原子核 ($A > 1$) の減速密度

q_{0H}, q_{1H} : 水素核 ($A=1$) の減速密度

u_0 : 付録 A の (A7c) 式である.

lethargy u' の中性子が減速されて u になった場合, 中性子束 $\Psi(z, \mu, u)$ は一次元 Boltzmann 輸送方程式で示せる.

この中性子束 $\Psi(z, \mu, u)$ を μ について Legendre 展開し拡散方程式と同形になる P_1 近似の取り扱いをすると, $\psi_0(z, u)$ と $\psi_1(z, u)$ の次の 2 式を得る.

$$\frac{\partial \psi_1(z, u)}{\partial z} + \Sigma(u)\psi_0(z, u) = v_M q_{0M}(z, u) + v_H q_{0H}(z, u) + S(z, u) \quad (B2)$$

$$\frac{1}{3} \frac{\partial \psi_0(z, u)}{\partial z} + \Sigma(u)\psi_1(z, u) = v_M q_{1M}(z, u) + v_H q_{1H}(z, u) \quad (B3)$$

ここで, $S(z, u)$ は等方中性子源で, $\Sigma(u)$ は均質媒質の全断面積で次のように示せる.

$$\Sigma(u) = v_M [\Sigma_{aM}(u) + \Sigma_{sM}(u)] + v_H [\Sigma_{aH}(u) + \Sigma_{sH}(u)] \quad (B4)$$

又, 上記の断面積の添字の a は吸収, s は散乱を示す.

次に, 各減速密度: $q_{0M}, q_{1M}, q_{0H}, q_{1H}$ の具体的な表示を示す.

$$q_{0M}(z, u) = \int_{u-u_0}^u du' \Sigma_{sM}(u') \psi_0(z, u') f_{0M}(u - u') \quad (B5a)$$

$$q_{1M}(z, u) = \int_{u-u_0}^u du' \Sigma_{sM}(u') \psi_1(z, u') f_{1M}(u - u') \quad (B5b)$$

ここで, $\alpha = (A + 1)^2 / 4A$, $f_{0M}(u) = \alpha e^{-u}$, $f_{1M}(u) = f_{0M}(u) \cos \psi$. $\cos \psi$ は付録 A の (A5) 式.

$$q_{0H}(z, u) = \int_0^u du' \Sigma_{sH}(u') \psi_0(z, u') f_{0H}(u - u') \quad (B6a)$$

$$q_{1H}(z, u) = \int_0^u du' \Sigma_{sH}(u') \psi_1(z, u') f_{1H}(u - u') \quad (B6b)$$

ここで, $f_{0H}(u) = e^{-u}$, $f_{1H}(u) = f_{0H}(u) \cos \psi$. $\cos \psi$ は付録 A の (A11) 式.

以上の議論から, lethargy u' の中性子束 $\Psi(z, \mu, u')$ が減速材中の原子核 ($A > 1$) と水素核とに同時に減速されて u に到達した中性子束 $\Psi(z, \mu, u)$ が Legendre 展開した P_1 近似の下に得られる事が分かる. 即ち, u と u' を与えれば, 6 個の変数: $\psi_0, \psi_1, q_{0M}, q_{1M}, q_{0H}, q_{1H}$ は (B2), (B3), (B5a), (B5b), (B6a), (B6b) 式の 6 個の方程式によって原理的には解ける筈である. 次に, 更なる物理的考察によって上の 6 個の方程式を単純化する.

B2. Marshak の年令理論 (Fermi の連続減速) による q_{0M} と q_{1M} 式の変形⁽⁶⁾

付録 A の表 A の u_0/ξ 欄に示したように原子核 ($A > 1$) の減速では, u_0 の最大のエネルギー

ギ一範囲でも中性子の衝突回数は平均して2~3なので、 $\psi_0(z, u)$ と $\psi_1(z, u)$ での減速中性子の u に対する変化は緩やかであると予測出来る。そこで、(B5a)と(B5b)式の被積分項に、次のような近似化:

$$\Sigma_{sM}(u') \doteq \Sigma_{sM}(u), \psi_1(z, u') \doteq \psi_1(z, u) \quad (\text{B7})$$

と、更に、 $\psi_0(z, u)$ については $u = u'$ の周りに Taylor 展開し次のように近似化する。

$$\psi_0(z, u') \doteq \psi_0(z, u) - (u - u') \frac{\partial \psi_0(z, u)}{\partial u} \quad (\text{B8})$$

そこで、(B7)式の前半の式と(B8)式を(B5a)式に代入して du' についての積分を実行する。付録Aに検討した積分結果を参照にすると、(B5a)式から

$$q_{0M}(z, u) = \Sigma_{sM}(u)\psi_0(z, u) - \xi \Sigma_{sM}(u) \frac{\partial \psi_0(z, u)}{\partial u} \quad (\text{B9a})$$

が得られ、(B7)式を(B5b)式に代入して上と同様の手順によって q_{1M} の式を得る。

$$q_{1M}(z, u) = \Sigma_{sM}(u) \langle \mu_0 \rangle \psi_1(z, u) \quad (\text{B9b})$$

B3. 水素 (A=1) の減速密度 q_{0H} と q_{1H} 式の変形

この場合は積分項の積分範囲が $0 \sim u$ である事から u について微分が出来る。即ち、

$$\frac{\partial q_{0H}(z, u)}{\partial u} = \Sigma_{sH}(u)\psi_0(z, u) - q_{0H}(z, u) \quad (\text{B10a})$$

$$\frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} = \Sigma_{sH}(u)\psi_1(z, u) - \frac{3}{2}q_{1H}(z, u) \quad (\text{B10b})$$

これらの式の各項を次のように入れ替える。

$$q_{0H}(z, u) = \Sigma_{sH}(u)\psi_0(z, u) - \frac{\partial q_{0H}(z, u)}{\partial u} \quad (\text{B11a})$$

$$q_{1H}(z, u) = \frac{2}{3}\Sigma_{sH}(u)\psi_1(z, u) - \frac{2}{3}\frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} \quad (\text{B11b})$$

B4. SG 近似法の最終方程式

(B9a)式の $q_{0M}(z, u)$ と(B11a)式の $q_{0H}(z, u)$ を(B2)式に代入し整理すると、

$$\frac{\partial \psi_1(z, u)}{\partial z} + \Sigma_a(u)\psi_0(z, u) = -v_M \xi \Sigma_{sM}(u) \frac{\partial \psi_0(z, u)}{\partial u} - v_H \frac{\partial q_{0H}(z, u)}{\partial u} + S(z, u) \quad (\text{B12a})$$

次に、(B9b)式の $q_{1M}(z, u)$ と(B11b)式の $q_{1H}(z, u)$ を(B3)式に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \frac{\partial \psi_0(z, u)}{\partial z} + \left[\Sigma_a(u) + v_M \Sigma_{sM}(u)(1 - \langle \mu_0 \rangle) + \frac{v_H \Sigma_{sH}(u)}{3} \right] \psi_1(z, u) \\ = -v_H \frac{2}{3} \frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} \end{aligned} \quad (\text{B12b})$$

ここで、

$$\Sigma(u) - v_M \Sigma_{sM}(u) - v_H \Sigma_{sH}(u) = v_M \Sigma_{aM}(u) + v_H \Sigma_{aH}(u) = \Sigma_a(u)$$

である。

即ち、4個の変数: $\psi_0, \psi_1, q_{0H}, q_{1H}$ は (B12a), (B12b), (B6a), (B6b) 式の4個の方程式によって原理的に解ける。実際に計算する時には、 $S(z, u)$ を与えた場合の結果の中性子束 $\Psi(z, \mu, u)$ の空間分布を直接解くことはなく、それらの分布が e^{ikz} であると仮定して k を一定値 ($k \neq 0$) として入力し、 u に関しては mesh に分解した差分方程式に変換して大型計算機によって、原子核 ($A > 1$) と水素による減速効果から同時に得られる原子炉炉心のエネルギー分布を数値的に求める。現実には開発された MUFT と云う計算コードを用いる。但し、無限大系の場合: $k = 0$ とすると、 $\partial\psi_0/\partial z = 0$ と $\partial\psi_1/\partial z = 0$ となり (B12a) 式と (B12b) 式の間に関連性がなくなる。本文第2章で説明したように、Fermi の (A) 式は無限大系内での中性子の軌跡を計算する方法で算出した。即ち、SG 近似法とは物理的考察の基盤が異なる。

B5. 中性子輸送断面積についての考察

Fermi が (B) 式を導出した際に、提起された 'persistence velocity effect' を含む中性子輸送断面積: $\Sigma_{tr}(u)$ は $k \neq 0$ の条件の下で Marshak の年令理論により得られる。この件も上と同じように物理的考察の基盤が異なるにも拘わらず同じ結果になる。

最初に、原子核 ($A > 1$) のみの中性子減速について Marshak の年令理論による $\Sigma_{tr}(u)$ を得る手順を次に説明する⁽⁶⁾。即ち、(B12b) 式で $v_H = 0$ 、即ち、 $v_M = 1$ とすると、

$$\frac{1}{3} \frac{\partial\psi_0(z, u)}{\partial z} + [\Sigma_{aM}(u) + \Sigma_{sM}(u)(1 - \langle \mu_0 \rangle)] \psi_1(z, u) = 0 \quad (B13)$$

が得られ、上の式の左辺の第2項 $[\Sigma_{aM}(u) + \Sigma_{sM}(u)(1 - \langle \mu_0 \rangle)]$ の最後の項が中性子輸送断面積: $\Sigma_{tr}(u)$ に相当する。即ち、年令理論による場合 $\Sigma_{tr}(u)$ は次式で示せる。

$$\Sigma_{tr}(u) = \Sigma_{sM}(u)(1 - \langle \mu_0 \rangle) \quad (B14)$$

この場合は、減速中の高速中性子の場合でも熱中性子と同様の式が得られる。

次に、水素 ($A = 1$) のみの中性子減速では、SG 近似による $\Sigma_{tr}(u)$ を得る手順として、(B12b) 式で $v_M = 0$ 、即ち、 $v_H = 1$ とすると、

$$\frac{1}{3} \frac{\partial\psi_0(z, u)}{\partial z} + \left[\Sigma_{aH}(u) + \frac{\Sigma_{sH}(u)}{3} \right] \psi_1(z, u) = -\frac{2}{3} \frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} \quad (B15)$$

が得られる。SG 近似が提案された初期の時点では、(B6b) 式の $q_{1H}(z, u)$ について年令理論の (B7) 式と同様の次のような近似化が提案されたと云われている。

$$\Sigma_{sH}(u') \psi_1(z, u') \doteq \Sigma_{sH}(u) \psi_1(z, u) \quad (B16)$$

従って、(B6b) 式の q_{1H} は次のように近似化される。

$$q_{1H}(z, u) \doteq \Sigma_{sH}(u) \psi_1(z, u) \cdot \int_0^u e^{-\frac{3(u-u')}{2}} du' = \frac{2}{3} \Sigma_{sH}(u) \psi_1(z, u)$$

実は、上の近似化された結果は (B10b) 式で

$$\frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} = 0 \quad (\text{B17})$$

とした場合に等しいから、この結果からの (B15) 式と (B13) 式を比較すると、初期 SG 近似では $\Sigma_{tr}(u)$ は

$$\Sigma_{tr}(u) = \Sigma_{sH}(u) \frac{1}{3} \quad (\text{B18})$$

と主張されている。この手順に対して Weinberg-Wigner は⁽¹⁶⁾ 初期 SG 近似は「最大の弱点 (the most problematical step)」と断定している。確かに、(B16) 式は原子核 ($A > 1$) の中性子減速で許される連続減速の概念による近似法であって、水素との中性子減速では許される物理的概念ではない。前章で述べたように、SG 近似計算では

$$\frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} \neq 0 \quad (\text{B19})$$

の結果が得られる筈である。但し、付録 A の (A14) 式によって水素 ($A = 1$) の中性子減速の場合は $\langle \mu_0 \rangle = 2/3$ になるので、(B14) 式に従うと (B18) 式の結果が得られる。

(B19) 式の結果を受けて、この「最大の弱点」を少しでも改善する方法を考えて見る。そこで、次のような関数を提案する。

$$\Lambda(z, u) = \frac{1}{\Sigma_{sH}(u) \psi_1(z, u)} \frac{\partial q_{1H}(z, u)}{\partial u} \quad (\text{B20})$$

ここで、 $q_{1H}(z, u)$ は (B6b) 式であり、もし、前章で述べた「最大の弱点」のない SG 近似計算の計算結果が得られたとすれば、(B20) 式から $\Lambda(z, u)$ の値は確定するであろう。しかし、ここでは大雑把な結果を得るために、(B7) 式の後半の近似: $\psi_1(z, u') \doteq \psi_1(z, u)$ のみを許容する事にする。これは本文第 6 章の“(A) 式 \neq (B) 式”の理由に「水素原子核の中性子のエネルギー依存性」があると云う結果を考慮したのである。従って、このように近似化された (B20) 式は次のようになる。

$$\Lambda(u) = \frac{1}{\Sigma_{sH}(u)} \frac{d}{du} \left[\int_0^u \Sigma_{sH}(u') e^{-\frac{3(u-u')}{2}} du' \right] \quad (\text{B21})$$

ここで、水素原子核の中性子のエネルギー依存性として、30KeV \sim 2MeV の中性子エネルギーの範囲についての V. McLane et al の測定値から⁽¹²⁾ fitting した次式を用いる。

$$\sigma_{sH}(u) = 2.8e^{au} : \quad a = \frac{8.9}{17} \quad (\text{B22})$$

最終的に、 $\Lambda(u)$ は次のようになった。

$$\Lambda(u) = 1 - \frac{3}{2a+3} \left[1 - e^{-(a+\frac{3}{2})u} \right] \quad (\text{B23})$$

そこで、(B15) 式の右辺は、 $-(2/3)\Sigma_{sH}(u)\psi_1(z, u)\Lambda(u)$ となるので、輸送断面積について

$$\Sigma_{tr}(u) = \Sigma_{sH}(u) \frac{1+2\Lambda(u)}{3} \quad (\text{B24})$$

が最終的に得られる。30keV~2MeVの中性子エネルギーの範囲で $\Lambda(u)$ は1~0.238であるから、中性子の水素減速では高速中性子に対する中性子輸送断面積は「SG近似計算での最大の弱点」である(B18)式のような事はない。そして、その場合には、水素の実効質量数が1を超えると云う計算結果が得られるが、その物理的意味に対しては十分な解釈を与える事は出来ないであろう。

付録 C: 球面三角法によるL系散乱角循環式の導出

λ_1 を基準にして、 $\lambda_2 \rightarrow \lambda_3$ に移動する中性子の軌跡が λ_1 と λ_3 との散乱角 $\angle 13$ の余弦の平均値を求める。但し、この付録では本文の近似(B)に従って次の近似を用いる。

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \quad (C1)$$

λ_1 , λ_2 と λ_3 の角度に関する関係を図C1に示す。

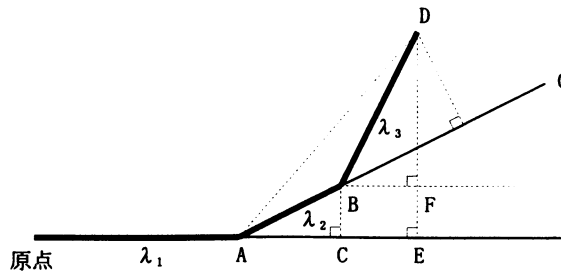


図 C1

図の各ベクトル間の角度は $\angle BAC = \angle 12$, $\angle DBO = \angle 23$, $\angle DBF = \angle 13$ である。即ち、 $\lambda_1 \lambda_2$ の角を $\angle 12$, $\lambda_2 \lambda_3$ の角を $\angle 23$, 最終的に計算すべき散乱角 $\angle 13$ は $\angle DBF$ である。

C1. Fermiの球面三角法

各 λ 値に対する(C1)式の近似で、この値を単位の1として、初めにFermiは、各 λ の関係は単位寸法1の半径を持つ球体の表面にある三角形の余弦法則に従って説明出来る事を示した^{(5),(8)}。又、Lamarshは同じ問題を別方法で説明を加えている⁽¹⁴⁾。

Fermiによると、球面三角形ABCの各頂点に対面する辺弧BC, 弧CA, 弧ABを各々a, b, c, とする。この場合では、それらの角度は次のように示される。

$$\angle a = \angle 13 \quad \angle b = \angle 12 \quad \angle c = \angle 23 \quad (C2)$$

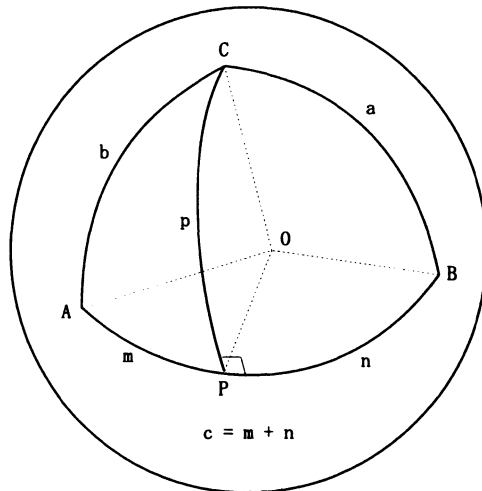


図 C2

図 C2 に示すように、球面上に三角形 ABC があり、点 A に対面する辺弧 BC の球中心: O に張る角度は $\angle COB = \angle a$ 、点 B に対面する辺弧 CA の上記と同じ角度は $\angle AOC = \angle b$ 、点 C に対しても同様に $\angle BOA = \angle c$ である。ここで、点 C から弧 AB へ垂線を下し、AB との交点: P を垂足とする。かように分割した弧 AB の AP の部分を m とし、点 B 側の AP の部分を n とすれば、

$$c = m + n \quad \text{即ち、} \quad \angle c = \angle m + \angle n \quad (C3)$$

である。又、垂線の弧 CP を p で示すと、各角度 $\angle p$ 、 $\angle m$ 、 $\angle n$ は次のようである。

$$\angle p = \angle COP, \quad \angle m = \angle AOP, \quad \angle n = \angle BOP$$

そして、球面 APC と球中心: O を含む体系を図 C2 から切り出し図 C3 に示す。

図 C3 では次のようになっている。先ず、C から \overline{OP} に垂線を下ろし、垂足点を D とする。更に、D から \overline{OA} に垂線を下ろし、交点を E とする。即ち、

$$\begin{aligned} \overline{CD} &\perp \overline{OP} \\ \overline{DE} &\perp \overline{OA} \end{aligned}$$

であるから、AOP と COP の 2 平面は互いに垂直であるので、 \overline{CD} は平面 AOP に垂直である。故に、 $\angle CDE = \pi/2$ 、且つ、‘三垂線の定理’によって $\overline{CE} \perp \overline{OA}$ 、従って、

$$\angle CED = \angle A \quad (C4)$$

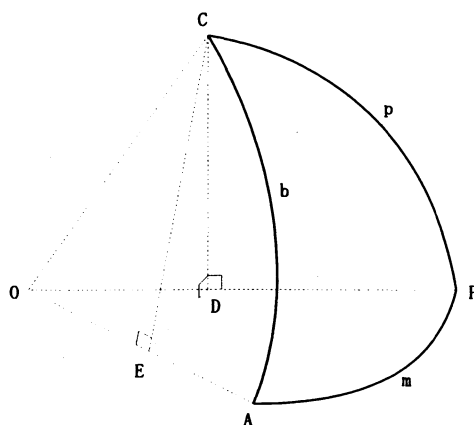


図 C3

となる。そこで、 $\cos \angle A$ は次のように得られる。

$$\cos \angle A = \frac{\overline{DE}}{\overline{CE}} = \frac{\overline{DE}/\overline{OE}}{\overline{CE}/\overline{OE}} = \frac{\tan \angle DOE}{\tan \angle COE} = \frac{\tan \angle POE}{\tan \angle COA} = \frac{\tan \angle m}{\tan \angle b} \quad (C5)$$

次に、 $\angle b = \angle AOC = \angle COE$ であるから、 $\cos \angle b$ は

$$\cos \angle b = \frac{\overline{OE}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} \cdot \frac{\overline{OE}}{\overline{OD}} = \cos \angle COD \cdot \cos \angle ODE = \cos \angle p \cdot \cos \angle m \quad (C6)$$

となる。図 C3 で $A \rightarrow B$, $b \rightarrow a$, $m \rightarrow n$ と置き換えれば、図 C2 で球面三角形 ABC の図 C3 の n 側の部分についての検討が出来る。即ち、 $\cos \angle a$ は次のようになる。

$$\cos \angle a = \cos \angle p \cdot \cos \angle n = \cos \angle p \cdot \cos \angle(c - m) \quad (C7)$$

ここでは、(C3) 式を用いた。そこで、(C6) 式と (C7) 式から $\cos \angle p$ を消去すると、

$$\cos \angle a = \frac{\cos \angle b \cdot \cos \angle(c - m)}{\cos \angle m} = \cos \angle b \cdot \cos \angle c + \cos \angle b \cdot \sin \angle c \cdot \tan \angle m$$

この式の $\tan \angle m$ に (C5) 式を代入すると、

$$\cos \angle a = \cos \angle b \cdot \cos \angle c + \cos \angle b \cdot \sin \angle c \cdot \tan \angle b \cdot \cos \angle A$$

ここで、 $\tan \angle b = (\sin \angle b)/(\cos \angle b)$ であるから、 $\cos \angle a$ は次のようになる。

$$\cos \angle a = \cos \angle b \cdot \cos \angle c + \sin \angle b \cdot \sin \angle c \cdot \cos \angle A \quad (C8)$$

$\angle A \equiv \angle \psi$ と (C2) 式によって、(C8) 式は次のような式になる。

$$\cos \angle 13 = \cos \angle 12 \cdot \cos \angle 23 + \sin \angle 12 \cdot \sin \angle 23 \cdot \cos \psi \quad (C9)$$

C2. λ_2 と λ_3 との関連

λ_3 は λ_2 の方向: BO と角度 $\angle 23$ で散乱され、そして、 O を中心として角 ψ で回転している。即ち、

$$\overline{OD} = \lambda_3 \sin \angle 23 \tag{C10}$$

で、ベクトル λ_1 と λ_2 を含む面に対して一般化すると次のようになる。

$$\overline{OG} = \lambda_3 \sin \angle 23 \cdot \cos \psi \tag{C11}$$

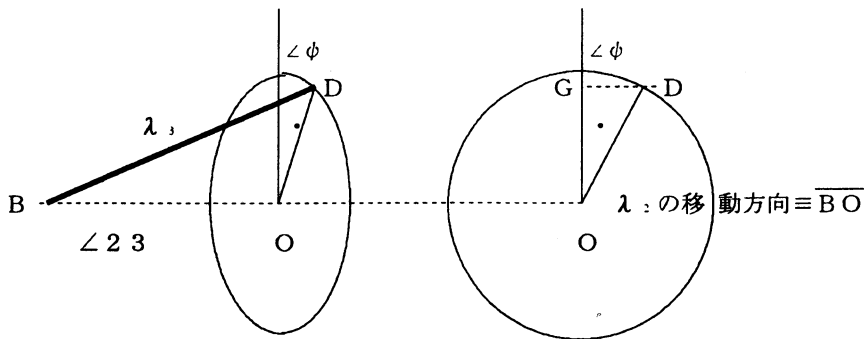


図 C 4

(C9) 式では (C1) 式の近似の下で $\lambda_3 = 1$ としている事に注意して、 $\cos \angle 13$ の平均値を

$$\langle \cos \angle 13 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos \angle 13 \, d\psi \tag{C12}$$

と定義すると、(C9) 式の最終項は $\cos \psi$ を含むので、この項はゼロになる。最終的に

$$\langle \cos \angle 13 \rangle = \cos \angle 12 \cdot \cos \angle 23 \tag{C13}$$

となる。

C3. L 系散乱角の一般化した循環式

(C13) 式の結果を拡張した一般式を次の近似条件の下に書き下す。

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_n = 1 \tag{C14}$$

高速中性子は減速材体系中を原子核との衝突散乱を受けながら減速移動して行く。その移動は、 $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 \rightarrow \lambda_3 \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_i \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_n$ である。この系列で任意の r と s 番目の λ

の間の散乱角を $\angle\lambda_r\lambda_s$ とする ($s > r$). この散乱角の余弦値は (C13) 式の結果から次のように一般化されて示めされる.

$$\langle \cos \angle\lambda_r\lambda_s \rangle = \prod_{i=r}^{s-1} \langle \cos \angle\lambda_i\lambda_{i+1} \rangle \quad (\text{C15})$$

参考文献

引用する論文その他は、主として E. Fermi による研究結果による。Fermi の論文は集められて “Note e Memorie”, collected papers: FNM, The University of Chicago Press から出版されている。第1巻 FNM I, 1921-1938, Italy, 第2巻 FNM II, 1939-1954, USA での研究結果で、各々1962, 1965年に発行されている。以下に、FNMでの paper no. を示す。

- (1) 1936年: E. Fermi; Sul moto dei neutroni nelle sostanze idogenate, *Ricerca Scienta*, VII-2, 13(1936), FNM I, no.119a, G. Temmer による英訳; On the Motion of Neutrons in Hydrogeneous Substances, FNM I, no.119b, 玉木英彦訳; 水素化合物中に於ける中性子の運動に就いて, 理研彙報, 雑録 第16輯 第3号, p. 170(昭和12年). 1938年ノーベル賞授賞式の Fermi の講演: Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombadment, FNM I, no. 128 の ‘the Slow Neutrons’ の章に, この特性計算式による成果が語られている。
- (2) 1940年9月25日: H. L. Anderson, E. Fermi; Production and Absorption of Slow Neutrons by Carbon, Report A-21, FNM II, no.136(1940).
- (3) 1942年3月10日: E. Fermi の講義; Slowing Down and Diffusion of Neutrons, Report C-29, FNM II, no.156(1942).
- (4) 1943年3月19日: E. Fermi; The Slowing Down of Neutrons in Heavy Water, Report C-530, FNM II, no.185(1943).
- (5) 1945年秋: Los Alamos 大学での Nuclear Physics に関する E. Fermi の講義; Part I, Chapter VI, The Slowing Down of Neutrons, Part II, Chapter IX, (11), Other Types of Piles, Chapter X, Fast Neutron Chain Reactions, FNM II, no.222(1946).
- (6) 1946年8月: LASL での R. E. Marshak の講義; Theory of the Slowing Down of Neutrons by Elastic Collision with Atomic Nuclei: *Rev. of Mod. Phys.*, 19, 185(1947).
- (7) 1946年夏: GE 社での R. E. Marshak の講義; R. E. Marshak, H. Brooks, H. Hurwitz; Introduction to the Theory of Diffusion and Slowing Down of Neutrons-I, *Nucleonics*, May,10(1949).
- (8) 1949年1-6月: Chicago 大学での Nuclear Physics に関する E. Fermi の講義; Chapter IX Neutron Physics, 小林稔等訳; 原子核物理学 第9章 中性子物理, 吉岡書店 (1954).

- (9) E. Fermi, E. Amaldi; On the Absorption and the Diffusion of Slow Neutrons, Phys. Rev., 50, 899(1936).
- (10) S. Glasston, M. C. Edlund; The Elements of Nuclear Reactor Theory, D. Van Nostrand Company Inc. (1952).
- (11) ‘persistency’ とは、一般に(影響等)が後まで残る現象を表し、持続、永続、残像と訳される。例えば ‘persistent current’ とは永久電流と訳され、超伝導体リングに電磁誘導によって生じた電流は電気抵抗がゼロのため、何時までも流れ続ける。又、プラズマが消えると、イオンは電子に比べて重いので、プラズマ内の電流が残像として短時間流れ続ける。即ち、本文第4章(Bii)に述べたように、熱平衡に達しようとした全ての減速中性子が ‘scatter up’ 現象によって、容易に熱中性子群に入らないと云う状態を無限級数で表した事を Fermi は ‘persistence velocity effect’ と名付けたと推測される。参考文献(8)の小林稔等が「速度を維持しようとする傾向」と訳したのは、この Fermi が表現しようとした物理的意味が十分に伝えられたとは思えない。むしろ、ここに説明した解説を加えるべきであったと考える。
- (12) V. McLane et al; Neutron Cross Sections, Vol. 2, National Nuclear Data Center, BNL, Academic Press, INC. (1988).
- (13) C. Goodman(editor); Introduction to Pile Theory, Addison-Wesley Press Inc. (1952). V. F. Weisskopf; Neutron Diffusion chapter 3, p.87, F. L. Friedman; Elementary Pile Theory, chapter 5, p.111.
- (14) J. R. Lamarsh; Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley Publishing Co. Inc. (1966). 武田充司, 仁科浩二郎訳; 原子炉の初等理論, 吉岡書店(1974年6月).
- (15) 慣性の法則(Newtonの第1法則): 静止又は一様な直線運動を行う物体は、これに力が作用しない限り、その状態を持続する。
- (16) A. M. Weinberg, E. P. Wigner; The Physical Theory of Nuclear Chain Reactors, the Univ. of Chicago Press (1958).
- (17) H. Soodak, E. C. Campbell; Elementary Pile Theory, John Wiley & Sons Inc. (1950).
- (18) D. J. Hughes; Pile Neutron Research, Addison-Wesley Publishing Co. Inc. (1953).
- (19) R. L. Murray; Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall Inc. (1954). 杉本朝雄訳; 原子核工学, 丸善株式会社(昭和30年6月).
- (20) S. Glasston; Principles of Nuclear Reactor Engineering, D. V. Nostrand Co. (1955). 金関義則, 服部学 訳; 原子力ハンドブック 原子炉編, 商工会館出版部(1956年1月).
- (21) B. Davison; Neutron Transport Theory, Oxford Univ. Press(1957).
- (22) G. I. Bell, S. Glasston; Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand Reinhold Co. (1970).

(23) H. Hurwitz, P. F. Zweifel; Slowing Down of Neutrons by Hydrogenous Moderators, J. of Appl. Physics, 26, no.8, 923(1955).

(24) 添字の H は水素原子核, M は水素以外の減速効果のない散乱原子核である.

$$\begin{aligned} \frac{\langle r^2 \rangle}{2} &= \lambda_H(0)\lambda_t(0) + \lambda_H(u_n)\lambda_t(u_n) + \lambda_t(0)\lambda_t(u_n)\epsilon(0, u_n) \\ &+ \int_0^{u_n} \lambda_H(u)\lambda_t(u)du + \lambda_t(0) \int_0^{u_n} \lambda_t(u)\epsilon(0, u)du \\ &+ \lambda_t(u_n) \int_0^{u_n} \lambda_t(u)\epsilon(u, u_n)du + \int_0^{u_n} \lambda_t(u)du \int_0^u \lambda_t(u')\epsilon(u', u)du' \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} \epsilon(u_1, u_2) &= \exp\left(-\int_{u_1}^{u_2} \left(\frac{3}{2} - \frac{\lambda_t(u)}{\lambda_H(u)}\right) du\right) \\ \lambda_H(u) &= \frac{1}{\Sigma_{sH}(u)}, \quad \lambda_t(u) = \frac{1}{\Sigma_{st}(u)}, \quad \Sigma_{st}(u) = \Sigma_{sH}(u) + \Sigma_{sM}(u) \end{aligned}$$

尚, M を吸収体とした場合は (A) 式と同じような式が J. Askin(私信, 未発表) により得られていて, その式は Marshak の論文に記載されている⁽⁶⁾.

(25) E. Fermi, A. M. Weinberg; Longitudinal Diffusion in Cylindrical Channels, Report C-170, FNM II, no.161, July 4 (1942). 及び R. F. Christy, E. Fermi, A. M. Weinberg; Effect of Temperature Changes on the Reproduction Factor, Report C-254, FNM II, no.163, Sept. 14(1942). 等の研究がある.

(26) G. Horway; On the Slowing Down of Neutrons, Phys. Rev., 50, 897 (1936).

(27) 深井佑造; シカゴ・パイル1号成功の鍵を握っていたのは誰か?, 科学技術史, 第6号, 1, 2002年12月.

(28) E. Fermi, L. Szilard; Neutronic Reactor, U.S. Patent Office, #2708656, patented May 17(1955).

(29) E. Fermi; Atomic Energy for Power, The George Westinghouse Centennial Forum, Science and Civilization-The Future of Atomic Energy, FNM II, no.224, May(1946).

(30) Board of Governors for ANL The Univ. of Chicago; Controlled Nuclear Chain Reaction the First 50 Years, American Nuclear Society (1992).

(31) 大地昭生; 超々臨界圧大容量蒸気タービンの開発と将来展望, ターボ機械, 第18巻, 第6号, p. 52 (1990).

(32) C. R. McCullough; Preliminary Design Proposal-Daniels Experimental Power Pile, MonN-188, Nov. 1, (1946). 同上; Summary Report on Design and Development of High Temperature Gas Cooled Power Pile, MonN-383, Sept. 15, (1947). 深井佑造; 幻の発電用原子炉—ダニエルズ・パワー・パイル, 科学朝日, 1, 106, Jan. (1994).

第2次大戦後の米国における 放射能戦の研究開発体制の成立過程: 1945-1948年

The Organizations for Research and Development on Radiological Warfare after the Second World War in the United States: 1945-1948

山崎研究室 栗原岳史*
KURIHARA, Takeshi

1. 序論

1.1. 本稿の目的

第2次世界大戦期において、米国は広島と長崎に対して原子爆弾を使用した。この原子爆弾を開発したのは、陸軍の組織であるマンハッタン工兵管区 (Manhattan Engineer District, 以下、MED と表記する) であった。戦争が終結すると、戦時の臨時組織であった MED は閉鎖されることになり、1946年に制定された原子力法によって設立した原子力委員会 (Atomic Energy Commission, AEC) が、MED の責任を引き継いだ。原子力法は、研究開発を含む原子力に関するすべてのことを、5人の文民 (civilian) の委員で構成される AEC の責任とすると定めており、軍人が AEC の委員になれないことになっていた。その結果、米国の原子力は文民管理となったと言われている。しかし現実には、核兵器を含む原子力の分野において、軍が強い発言力を持ってきたことは明白であろう。

本稿は、原子力の文民管理の成立した後に、原子力の分野において軍の責任が拡大してきたことに注目する。特に、本稿は、放射性物質を兵器として使用する放射能戦 (Radiological Warfare) の研究開発体制において、軍がその責任の一部を担うことになった過程を明らかにする。

原子力法では、放射能戦を意味する「放射性物質の軍事利用」を AEC の責任とすることになっていたが、1948年の末までに成立した放射能戦の研究開発体制において、AEC と軍が、それぞれ責任を分担して研究開発を行うことになった。この体制において、AEC は放射性物質の生産や、放射線の影響の生物学・医学的研究の責任を担うことになり、軍は、放射性物質の散布方法、放射線からの防御、放射線物質に汚染された地域から汚染物質を除去するための研究開発の責任を担うことになった。AEC と軍で責任を分割して放射能戦の研究開発を行うことは、原子力の文民管理の名の下で、軍の責任が拡大したことを意味した。

本稿は、これまで歴史的に研究されることがほとんどなかった、国防省の研究開発委員会 (Research and Development Board, RDB) と、軍特殊兵器計画 (Armed Forces Special Weapons Projects, AFSWP) に注目する。そして、この2つの組織が、放射能戦の研究開発体制の責任の一部を軍が担うために、中心的な役割を果たしたことを明らかにする。

* 東京工業大学、および科学史技術史研究所. email: kurihara.t.ab@m.titech.ac.jp

1.2. 先行研究

AEC 公史の3部作¹は、戦後の放射能戦の研究開発の体制について、ほとんど言及していない。Bruheze は、戦後の放射能戦の研究開発に着目して先駆的な歴史研究を発表し、兵器として使用する放射性物質の性質や生産に関する AEC と軍の間の論争を明らかにしてきたが、研究開発の体制に関して、特に軍の側の動きについては、ほとんど言及していない²。

状況が変わったのは、『アルバカーキ・トリビューン』のアイリーン・ウェルサム³の活躍により、戦時中のマンハッタン計画から戦後の米国の核開発において、人体に対する放射線の影響の研究のために、人体実験が行われていたことが明らかになった以降である³。その結果、1996年に米国政府による『放射線人体実験報告書』が出版され⁴、それに伴い多くの公文書が公開された。本稿の使用した放射能戦に関する文書も、このとき利用できるようになったものが多い。『放射線人体実験報告書』は、戦後の放射能戦の研究開発の概要も説明しているが、報告書の目的から、人体実験の有無と情報公開に関することに重点が置かれており、研究開発体制については、簡単な概要を説明しているだけで、その成立過程についてほとんど言及していない⁵。

本稿の注目する放射能戦と RDB や AFSWP の関係については、歴史的な研究がほとんどなされていない。RDB については、H. York らが米国における戦後の軍事研究体制の変遷についての研究の一部で言及しているが、RDB が十分な権限を持たなかったため、その期待に十分応えられなかったとして、RDB に対する評価はきわめて低い⁶。本稿は、RDB の下部組織である原子力小委員会

¹ Richard G. Hewlett and Oscar E. Anderson, Jr., *The New World: A History of the United States Atomic Energy Commission, Volume 1, 1939-1946* (University of California Press, 1990); Richard G. Hewlett and Francis Duncan, *Atomic Shield: A History of the United States Atomic Energy Commission, Volume II 1947-1952* (University of California Press, 1990); Richard G. Hewlett and Jack M. Holl, *Atoms For Peace and War, 1953-1961: Eisenhower and the Atomic Energy Commission* (University of California Press, 1989).

² Adri De La Bruheze, "Radiological Weapons and Radioactive Waste in the United States: Insiders' and Outsiders' View," *The British Journal for the History of Science* 25(1992), 207-217.

³ アルバカーキ・トリビューン編 (広瀬隆訳、解説)『マンハッタン計画: プルトニウム人体実験』(小学館, 1994年); アイリーン・ウェルサム (渡辺正訳)『プルトニウムファイル (上)(下)』(翔泳社, 2000年)(原題: Eileen Welsome, *The Plutonium Files* (Delacorte Press, 1999)).

⁴ United States Advisory Committee on Human Radiation Experiments, *Final Report of the Advisory Committee on Human Radiation Experiments* (Oxford University Press, 1996)

⁵ *Ibid.*, 325-329.

⁶ Herbert F. York and G. Allen Greb, "Military Research and Development: A Postwar History," *Bulletin of the Atomic Scientists* 33(Jan. 1977), 13-26. 誤植等が修正された版が次の文献に収録されている。Thomas J. Kuehn and Alan L. Porter, eds., *Science, Technology, and National Policy* (Cornell University Press, 1981): 190-215. RDB に対する York の低い評価は、D. Kevles や国防省の公式通史に引き継がれている。Kevles は、York の論文を引用して、RDB には十分な権限がなかったことと、科学者と軍人とのコンタクトが十分でなか

(Committee on Atomic Energy, CAE) に注目して、CAE が、原子力に関する研究開発における軍の責任を拡大させるために重要な役割を果たしたことを明らかにする⁷。AFSWP については、関係者の証言に主に依拠した歴史研究⁸や、AFSWP の後継組織による公式通史⁹が近年になって公刊され、AFSWP の技術将校たちが、取り扱いに高度な専門技能を必要とする原子爆弾を、実際に使用できる状態にしたことを称えている。しかし、これらには AFSWP の重要な任務の一つであった放射能戦の研究開発に関する記述はほとんどない。本稿は、これまでほとんど歴史的に研究されてこなかった、軍の組織である CAE や AFSWP と放射能戦の研究開発についても明らかにする。

1.3. 文書資料について

本稿の作成にあたり、米国立公文書館 II (National Archives II, College Park, Maryland, USA, NARA) の所蔵する AEC 文書¹⁰、RDB 文書¹¹、AFSWP 文書¹²と、米国エネルギー省 (Department of Energy, DOE) の運営するオープンネット・データベースの所蔵する文書 (以下、DOE オープンネット文書と表記する) を主に利用した¹³。DOE オープンネット文書からは、米国立公文書館で利用できなかった、放射能戦の研究開発体制に関する AEC 文書や RDB 文書のいくつかも入手することができた¹⁴。本稿で使用した DOE オープンネット文書について、文書に付けられている NV で始まるデータベースの Accession Number を記した。

ったとしている。Daniel J. Kevles, "Cold War and Hot Physics: Science, Security, and the American State, 1945-56," *HSPS* 20:2(1990), 239-264. 特に 246-249. 国防省の公史も York の論文を引用し、「RDB には効果的に調整を行うために必要な意志決定のための権限と組織構造が欠けていた」としている。Steven L. Rearden, *The Formative Years, 1947-1950* (Historical Office, Office of the Secretary of Defense, 1984): 96-103.

⁷ York 以降に RDB の成立過程やその初期の活動内容に注目した歴史研究として、Needell の著作があげられる。Needell は、RDB の初代事務官を務めた L.V. Berkner に注目し、決して十分ではなかったが、RDB が科学と軍を結びつける役割を果たしたことを評価している。Needell は、RDB の組織の一つである電子機器小委員会に注目しており、原子力小委員会 (CAE) にはほとんど言及していない。Allan A. Needell, *Science, Cold War and the American State: Lloyd V. Berkner and the Balance of Professional Ideals* (Harwood Academic Publishers, 2000).

⁸ James L. Abrahamson, Paul H. Carew and Martin Carnoy, *Vanguard of American Atomic Deterrence: The Sandia Pioneers, 1946-1949* (Praeger, 2002); James L. Abrahamson, "The Sandia Pioneers," *American Diplomacy* (July 21, 2002).

⁹ Defense Threat Reduction Agency, *Defense's Nuclear Agency 1947-1997* (DTRA, 2002).

¹⁰ Record Group (RG) 326: Records of the Atomic Energy Commission.

¹¹ RG 330: Records of the Office of the Secretary of Defense, Entry 341: Research and Development Board, Records concerning Organization, Budget, and the Allocation of Research and Development, 1946-1953.

¹² RG 374: Records of the Defense Threat Reduction Agency, 1943-73. Defense Threat Reduction Agency (DTRA) は AFSWP の後継組織である。

¹³ URL: <https://www.osti.gov/opennet>

¹⁴ 本稿で使用した文書の作成者、表題、日付は、原則としてデータベースの表記に準じているが、明らかな誤りの場合は文書の中身に合わせた。

2. 第2次大戦終結後の原子力研究開発体制の再編成

2.1. 原子力法の設立と軍の影響力の低下

第2次世界大戦期に米国の原子爆弾を開発したのは、陸軍の組織のマンハッタン工兵管区 (MED) であった。戦争が終結すると、新たに AEC が設立され、AEC が MED の「すべての資産」を引き継ぐことになった。

1946年8月に原子力法¹⁵が成立すると、AECは、5人の文民だけで構成され、軍人はAECの委員になれないことになった。AECを文民の政府機関とするために、マンハッタン計画に参加した科学者たちを中心とした、活発なロビー活動が展開されたことはよく知られている。ロビー活動に参加した科学者たちは、原子力を国際管理とすることを主張し、研究開発を軍の管理下におくことを強く批判していた。彼らの活動は多くの人々に支持され、その結果、AECは文民機関となったのであった¹⁶。AECが文民機関となったことは、AECが兵器開発を含む原子力の研究開発全体の責任を負う組織であるにも関わらず、軍がその最高意思決定機関から外されたことを意味した。

原子力法 Section 9. (a). によって、すべての核兵器とその部品、すべての核分裂物質、その他原子エネルギーの生産や研究開発に関するすべての施設、データ、設計図、特許、契約を、AECが所有することを定められた。この規定にしたがって、1946年12月31日、行政指令9816が発せられ、MEDの所有する原子力に関する「すべての資産」がAECに移管された¹⁷。その結果、戦後の原子力に関する研究開発体制における軍の影響力は、戦時中のMEDのときと比べて、きわめて低下したといえる。

AECの委員に軍の代表が就任できなくなったが、原子力法 Sec. 2. (c). の規定で、軍は、AECの下に設置され軍の代表で構成される軍事連絡委員会 (Military Liaison Committee, MLC) を通して、「MLCが軍事的応用に関係するとみなしたすべての原子力の問題」について、AECに「助言」、「相談」、「勧告」ができることになった。初代MLC委員長には、Lewis H. Brereton 中将が就任した (1948年4月5日まで)。また、MLC委員には、MED司令官を務めた Leslie R. Groves 中将も就任した (1948年2月29日まで)。1948年2月に Groves が退役すると、MEDで Groves の副官であり、戦後は Groves に続いて AFSWP のチーフを務めた Kenneth D. Nichols が MLC の委員に就任した (1951年2月1日まで)¹⁸。また、

¹⁵ "Atomic Energy Act of 1946 (public Law 585, 79th Congress)," James D. Nuse, *Legislative History of the Atomic Energy Act of 1946, Volume 1, Principal Documents* (U.S. Atomic Energy Commission, 1965).

¹⁶ A. K. スミス (広重徹 訳) 『危険と希望 アメリカの科学者運動: 1945-1947』(みすず書房, 1968年) 原題: Alice K. Smith, *A Peril and A Hope, The Scientists' Movement in America: 1945-47* (The University of Chicago Press, 1965).

¹⁷ Executive Order 9816, Providing for the Transfer of Properties and Personnel to the Atomic Energy Commission, Dec. 31, 1946, The Truman Presidential Museum & Library. 陸軍長官が軍事的に重要とみなした資産については、AECと協議をして、AECに移管されないことになった。AFSWPの拠点があったニューメキシコ州アルバカーキの Sandia 基地は、Nicholsらの強い主張で軍の管理下に残された。New World, 620-624, 634-655.

¹⁸ *Atomic Shield*, 666.

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

原子力法 Sec. 2. (a). (4). (B). の規定により、AEC に設置される軍事応用部 (Division of Military Application) の部長には、軍の代表が就任することになり、初代部長には、James McCormack, Jr. 准将が就任した (1951年8月19日まで)¹⁹。MLC や軍事応用部を通じて、軍は原子力に関することについて、AEC に自身の見解を発言できることになったが、それを承認するかどうかは AEC が決定することであった。

原子力の文民管理を定めた原子力法の制定によって、軍は、戦時中のように、原子力に関することに大きな影響力を発揮することができなくなった。

2.2. 軍における研究開発体制の再構築

AFSWP の設立

原子力法が議会を通過した直後の 1946 年 9 月、陸軍は、ヴァージニア州 Fort Belvoir で、原子爆弾に関する歴史、物理学、効果、軍事的示唆を軍内部に普及することを目的とした会議を開催した。この会議の席で、MED 司令官の Groves は、原爆を含めて、「あらゆる新兵器の研究開発を続けることが陸軍の政策である」と発言し、AEC 設立後も軍が原子力関係の兵器の研究開発を続けることを主張した²⁰。また、MED で Groves の副官を務めた Nichols 大佐は、原子力が兵器であることを強調し、軍が原子力の研究開発に関与することを主張した。そして、原子力の軍事的応用に関する開発は、陸軍や海軍の下において最もよくなされることができると Nichols は主張した²¹。軍は、原子力の文民管理を定めた原子力法の成立した後も、原子力に関する兵器開発のすべてを AEC に委ねるのではなく、軍自身も行うことを意図していたのである。

MED の資産が AEC へ引き継がれた日である 1946 年 12 月 31 日、陸軍と海軍の両長官の合同で、陸軍参謀長と海軍作戦本部長に直属する組織として AFSWP²² が設立された。AFSWP のチーフと副チーフは陸軍参謀長と海軍作戦本部長によって選出され、共に AEC の軍事連絡委員会の委員を兼任することになった。AFSWP の初代チーフには、MED 司令官の Groves 准将が就任した。AFSWP は、AEC に移管されない MED における軍の組織と人員を引き継いだ²³。

AFSWP の任務は、「原子力に関する軍のすべての職務の責任を担うこと」と

¹⁹ *Atomic Shield*, 666.

²⁰ Maj. Gen. L. R. Groves, USA, "History of the Manhattan Project," Fort Belvoir, Virginia, 23 Sep. 1946, Note on Atomic Energy, RG 374, Entry 19: Office of the Historian Reports, 1943-1948, Box 18, NARA.

²¹ Colonel K. D. Nichols, "Responsibilities of the Military under the McMahon Bill: Atomic Weapons and Atomic Power," 25 Sep. 1946, Note on Atomic Energy, RG 374, Entry 19, 1943-1948, Box 18, NARA.

²² Welsome によれば、AFSWP は "afswop" と発音される。 *The Plutonium Files*, 177.

²³ MED が正式に閉鎖されたのは 1947 年 8 月 15 日である。それまで MED に残っていた人員も、その日に AFSWP に引き継がれた。Chas. G. Hole, Colonel, Corps of Engineers Executive, Subject: Abolishment of the Manhattan District, General Orders No. 14, War Department Office of the Chief of Engineers 8 August 1947, Appendix D: Agency Charters, *Defense's Nuclear Agency*, 405.

され、主要な任務として次のことが定められた。

1. 原子爆弾を扱う特別要員を訓練する。
2. AEC と調整して、すべてのタイプの原子兵器の開発に参加する。
3. 放射線測定装置の開発と、放射線の測定作業を実施する。

1. は、原子爆弾のパーツの保管とメンテナンスを行い、必要な時に原子爆弾を組み立てるための人員を育成することである²⁴。また、そのための手順の標準化や、必要な器具や装置の開発なども含まれた。そして、2. で、AFSWP が原子力に関する兵器の開発を行うことが明記された²⁵。

軍は、MED の後継組織として AFSWP を設立し、自身も原子力に関する研究開発を行うことを目指した。

国防省研究開発委員会の設立

レーダーや原子爆弾を開発した第2次大戦期の科学動員を、軍指導部は高く評価していた。軍は、戦後も民間の科学者と協力して、最新の科学の研究成果を新兵器の開発に利用することが重要だと考えるようになった²⁶。

1946年7月、軍は陸海軍の両長官に直属する組織として、統合研究開発委員会 (Joint Research and Development Board, JRDB) を設立した。JRDB の委員長には、民間科学者出身の科学行政官の Vannevar Bush 博士が就任した。Bush は、戦時の科学動員を統轄した科学研究開発局 (The Office of Scientific Research and Development, OSRD) の局長を務め、MED を指揮した最高政策グループ (Top Policy Group) や軍事政策委員会 (Military Policy Committee) の委員として、原爆開発で指導的な役割を務めた人物であり、軍からの信頼も厚かった。Bush の他には、陸海軍からそれぞれ2名の代表が委員に就任した²⁷。

JRDB の任務は、直接研究活動を管理するのではなく、軍内部で行われる研究開発活動を調整することだった²⁸。また、軍事的に重要な科学について、軍長官に助言することだった。JRDB の下に、民間科学者と軍人で構成された専門の小

²⁴ 原子爆弾の部品を適切に保管し、使用するとき組み立てることは、AFSWP の主要な任務の一つであった。AFSWP は1947年11月までに、核物質を除いた原爆を使用した最初の演習に成功した。本稿では、放射能戦に関することに焦点をあてるため、それ以外の AFSWP の活動について言及しない。

²⁵ Appendix to Volume I, Chapter 2, "Charter" of 8 July 1947, "First History of AFSWP 1947-1954," (1954); Appendix D: Agency Charters, *Defense's Nuclear Agency*, 403-404.

²⁶ War Department Public Relations Division, Address by Major General H. S. Aurand, Director, Research and Development Division, War Department General Staff, before the Engineers Joint Council, Biltmore Hotel, Los Angeles, California, July 26, 1946, JRDB 22/1, RG 330, Entry 341, Box 18, Folder 17: 22/JRDB Annexes, NARA.

²⁷ 陸軍から J. L. Devers 将軍, Carl Spaatz 将軍, 海軍から D. C. Ramsay 提督, Paul F. Lee 少将が JRDB の委員に就任した。

²⁸ Charter: Joint Research and Development Committee, June 6, 1946, Box 59, Folder 1403: Joint Research and Development Board, April-June 1946, Vannevar Bush, Manuscript Division, Library of Congress, Washington, D. C., USA.

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

委員会が設置され、これらの小委員会がそれぞれの専門分野を担当した。小委員会には、航空、原子力、基礎物理学、化学戦、電子機器、誘導ミサイル、医科学などがあった²⁹。

1947年に国家安全保障法が制定され、国防総省が設立されると、JRDBは国防長官直属の組織となり、国防省研究開発委員会 (Research and Development Board, RDB) となった。RDBには空軍の代表2名も加わり、組織と人員をJRDBから引き継いだ³⁰。

軍は、戦時の科学動員において、民間科学者と軍を結びつけた OSRD の役割を、戦後に RDB が果たすことを期待したのであった。

国防省研究開発委員会の原子力小委員会 (CAE)

本稿は、RDBの小委員会の中から、放射能戦の研究に関係した原子力小委員会 (Committee on Atomic Energy, CAE) の活動に注目する。

CAEは、1946年8月15日にJRDBの小委員会の一つとして設立され、CAEの基本的な目標として、国防に関係する、原子力の軍事的応用の研究開発計画について、研究、評価、改良、責任の割当を行なうことが定められた。CAEの委員は、JRDB委員長に任命された3名の文民と、陸軍と海軍の長官から任命された軍の代表それぞれ3名ずつの、計9名で構成された。CAE委員長は、3人の文民委員の中から、JRDBの委員長に任命されることになった³¹。

CAEの初代委員長に任命されたのは、国防研究委員会 (National Defense Research Committee, NDRC) の委員長として Bush と共に戦時の科学動員を指導し、原爆開発において最高政策グループと軍事政策委員会の委員として MED の指導的な立場いた、ハーバード大学学長の James B. Conant 博士が任命された。その他の CAE の文民の委員として、MED のロスアラモス研究所の所長を務めた J. Robert Oppenheimer 博士と、MED でプルトニウムの生産を担当したデュポン社の C. H. Greenwalt 博士が任命された。CAE の軍人の委員には、MLC の委員が任命されることになった³²。

1947年1月4日に、第1回 CAE 会議が開催された。この会議には、JRDB 委員長の Bush も出席した。Bush は会議の冒頭で、「最も重要な領域の一つにおいて、CAE は JRDB の果たす責任のすべてを担う」と発言し、JRDB における CAE の任務の重要性を強調した。会議では、CAE の規則が作成された³³。その主な内

²⁹ Joint Research and Development Board, Annual Report of the Executive Secretary, JRDB 78/1, 30 June 1947, RG 330, Entry 341, Box 25, Folder 7: 78/ JRDB Annexes, NARA.

³⁰ Steven L. Rearden, *The Formative Years, 1947-1950* (Historical Office, Office of the Secretary of Defense, 1984), 96-103.

³¹ L. V. Berkner, JRDB Directive, Formation of a Committee on Atomic Energy, AE 1/1, 15 Aug. 1946, RG 330, Entry 341, Box 76, Folder 1, AE: Agendas and Minutes, 1946-1951, NARA.

³² 第1回 CAE 会議に参加した軍の委員は、L. H. Brereton 中将 (MLC 委員長), L. E. Oliver 陸軍少将, J. H. Hinds 陸軍大佐, R. A. Ofstie 海軍少将, T. A. Solberg 海軍少将, W. S. Parsons 海軍少将であり、全員 MLC の委員である。

³³ Annex A, to Minutes of First Meeting, AE 4/2, 4 Jan. 1947, RG 330, Entry 341, Box 77,

容は次の通りである。

1. JRDBとAEC間のコミュニケーションは、MLCを通じて行う。
2. CAEは、MLCとAECの間で交わされる研究開発に関するすべての「助言」と「相談」の内容を伝えられ、その「相談」に参加する。
3. CAEは、MLCがAECに提出する研究開発に関する勧告を、事前に手に行うことができる。不同意があれば、陸海軍の長官にそれを伝えることができる。

CAEは、原子力に関する軍の研究開発活動の最高位の情報を手にして、MLCと共に、軍の研究開発活動を指導的な役割を果たすことになった。1947年7月18日、BushはJRDBの最初の年報を陸軍長官Pattersonに提出し、CAEが原子力の分野における軍事研究開発の計画を作成する任務を持ち、CAEとMLCが、AECと戦争計画とのリンクを形成すると報告した³⁴。CAEは、原子力の軍事利用のための、軍の重要な組織と位置づけられていたのである。

第2次大戦後に軍の研究開発体制が再構築され、AECの軍事連絡委員会(MLC)、軍事応用部門に加えて、AFSWP、国防省研究開発委員会の原子力小委員会(CAE)が、軍における原子力関連の研究開発を指導することになった。MLCの委員が、AFSWPのチーフや、民間科学者も含まれるCAEの委員を兼任しており、原子力の分野において、一貫した指導体制が構築されたといえる。戦時中にMEDの司令官だったGrovesが戦後にAFSWPのチーフとなり、MEDを含む科学動員を指導したBushとConantが、それぞれRDBの委員長、CAEの委員長として、戦後の軍事に関する原子力の研究開発に関わることになった。

3. 放射能戦の実現可能性と研究開発体制の構築

3.1. 軍における放射能戦に対する強い関心

広島と長崎への原爆投下後、米国政府は原爆による放射線の被害を過小に評価する声明を出していたが、人体に対する放射線の影響に関心を持ち、すぐに調査団を日本に派遣していた。それらの調査を引き継ぎ、1946年11月には、「原爆傷害調査委員会(Atomic Bomb Casualty Commission, ABCC)」が広島と長崎に設立され、日本の被爆者たちの情報が収集された。また、1946年6月に南太平洋で実施された原爆実験のクロスロード作戦において、実験の標的となった艦船や周囲の放射能汚染が調査された³⁵。これらの調査から、放射線のもつ強い毒

Folder 4: 3/1 Atomic Energy Committee Minutes.

³⁴ Bush to Patterson, Secretaries of War, 18 July 1947, RG 330, Entry 341, Box 25, Folder 11: 82/ JRDB Item, NARA.

³⁵ 高橋博子『封印されたヒロシマ・ナガサキ: 米核実験と民間防衛計画』(凱風社, 2008年): 40-77, 80-91頁。高橋は、日本で収集された原爆医学情報が、米軍病理学研究所で核シェルターに守られて厳重に保管されてきたことを明らかにし、「原爆医学情報が学術目的よりも軍事目的に扱われていた事実を象徴している」(76頁)と、被爆者の情報が軍事的に重要な意味をもっていたであろうことを指摘している。

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

性を、兵器として利用することにも関心が向けられたのは当然であろう。

MEDの資産がAECへ引き継がれた1946年12月31日、Joseph G. Hamilton 博士³⁶は、軍が放射能戦の実現可能性について研究を行うことを勧告する報告書をNichols大佐に提出した。この報告書は非公式なもので、Nicholsの依頼で作成されたものだった³⁷。Hamiltonはこの報告書で、放射性物質を兵器として使用する場合の特徴として、数マイクログラムで人体に致死的な影響を引き起こすことや、放射性物質による汚染を取り除くことが困難であることを指摘した。放射性物質を兵器として使用する場合の標的について、大都市の一般市民に対して使用することや、軍事的に重要な施設や産業施設に対して使用して一定の期間利用できなくさせることを提案した。放射能戦を実現するための今後の課題として、放射性物質を霧状や粉末状にして散布する方法がこれまで研究されてきたが、戦闘で使用できる状況にはないとしている。最後にHamiltonは、軍が放射能戦の問題全体を包括的に検証することが必要であると勧告した³⁸。

Hamiltonの報告書を受け取ったNicholsは、1947年1月24日付のMLC宛のメモで、放射能戦の研究開発に取り組むことをMLCに提起した。Nicholsは、Hamilton報告書で提起されたような、放射性物質を兵器として使用する可能性の研究はマンハッタン計画でも行われてきたが、これまで「決定的な計画」は行われてきておらず、現時点でも進展はないと述べた。そしてNicholsは、放射能戦の計画全体を「総合的な攻撃 (comprehensive attack) の課題」にするべきで、そのことは軍事的に重要な利益をもつと述べた³⁹。Nicholsは、マンハッタン計画でも実施されていた放射能戦の研究を、攻撃用の兵器の開発に重点をおいた研究計画として再開させることを提案したのであった。

MLC宛のNicholsのメモは、3月27日に開催された第3回CAE会議で審議された。会議では、CAE委員のOppenheimerが、現在の状況では、放射能戦の問題は政策の基本を制定するのに十分ではないと、放射能戦に関する研究が十分に行われていないことを指摘した。結局、海軍のParsons提督の提案で、放射能戦の問題について、AFSWP、MLC、CAEが共同で、さらに検討していくことに

³⁶ Hamiltonは、戦時中のMEDにおいて放射能戦の研究を行っており、1944年の時点で、放射性物質を兵器として使用する方や使用した場合の予想される人体への被害についての報告書を提出していた。山崎正勝、日野川静枝編『原爆はこうして開発された』（青木書店、1997年）、166-168頁。

³⁷ Joseph G. Hamilton, "Memo to K. D. Nichols, Subject: Radioactive Warfare to Colonel K. D. Nichols," 31 Dec. 1946, NV0402610.

³⁸ Joseph G. Hamilton, "Memo to K. D. Nichols, Subject: Radioactive Warfare," 1946 Dec. 31, NV0402611. この報告書で、Hamiltonは日本の被爆者たちについては言及していない。しかしクロスロード作戦については、「クロスロード作戦の経験は...(略)...核分裂生成物質に汚染されたときに直面する困難さを強調した」と述べ、放射能戦の提案にクロスロード作戦の影響があったことを示唆している。

³⁹ K. D. Nichols, Colonel, Corps of Engineers, Acting Deputy General Manager, "Memorandum to Chairman, MLC, Subject, Military Application of Fission Products," AE 13/1, 24 Jan. 1947, RG 330, Entry 341, Box 76, Folder 1: AE Agendas and Minutes, 1946-1951, NARA.

なった⁴⁰。

1946年末から1947年始めにかけて、軍において放射能戦への関心が再び高まり、原子力の研究開発に関わる軍の組織が共同で、放射能戦に関する調査が開始されることになった。

3.2. 軍における放射能戦の研究開発体制の構築と AFSWP

1947年7月30日、第8回CAE会議において、放射性物質の軍事的応用、放射線検出装置、汚染除去、放射線耐性が議題となった。これらの議題について、CAEは、「AFSWPの組織計画を考慮して検討しなければならない」とされた⁴¹。放射能戦の研究開発に関して、CAEはAFSWPの役割を重視していたといえる。

第8回CAE会議の同日、CAEは、CAE委員長のConantの名前で、「放射線耐性(Nuclear Radiation Tolerances)」という表題のメモをJRDBに送付した。このメモでCAEは、「原子兵器」の使用によって放射線に汚染された地域で作戦行動を行うためには、人体の放射線耐性について知る必要があるため、それをAFSWPに調査させることをJRDBに勧告した。また、調査の方法についてもCAEは、AECにこの問題を提起するのか、もしくはAFSWP自身が専門家による調査委員会を設置するかして、この問題についてAFSWPが調査することを勧告した⁴²。1947年10月17日、JRDB委員長のBushは、このCAEからのメモを1947年7月30日付でJRDB 92/1として、JRDBが人体の放射線耐性の研究をAFSWPに行わせることを承認したことを陸軍長官に報告した⁴³。

また第8回CAE会議の7月30日に、CAEは、「放射性物質の軍事的応用(Military Application of Radioactive Materials)」という表題で、「攻撃的な戦闘における(in offensive warfare)毒物として」、放射性物質を使用するための継続的な研究を、AFSWPが行うことを勧告するメモをJRDBに送付した。このメモには、「JRDB 88/4」と番号が付けられた⁴⁴。1947年10月14日、Bushは、JRDBがJRDB 88/4の勧告に合意し、放射性物質を攻撃用に兵器として使用する問題の研究をAFSWPに委託することを、AFSWPチーフのGroves将軍に通達した⁴⁵。

⁴⁰ D. B. Langmuir, Minutes of Third Meeting, 10 March 1947, AE 3/3, 27 March 1947, RG 330, Entry 341, Box 77, Folder 4: 3/1 Atomic Energy Committee Minutes, NARA.

⁴¹ Agenda for the Eight Meeting, 30 July 1947, AE 2/8, RG 330, Entry 341, Box 76, Folder 1: AE - Agendas and Minutes, 1946-1951, NARA. この日の議事録が公開されていないため、第8回CAE会議でどのような議論がなされたのかは不明である。"Top Secret," Log No. 2253, Minutes of 8th Meeting, AE 3/8, 4 Aug. 1947, RG 330, Entry 341, Box 77, Folder 4: 3/1 Atomic Energy Committee Minutes, NARA.

⁴² J. B. Conant, "Appendix F to Minutes of Eighth Meeting, of the Committee on Atomic Energy, 30 July 1947, on Nuclear Radiation Tolerances," NV0757151.

⁴³ V. Bush, Chairman of JRDB to The Secretary of Army, JRDB 92/1.2, 17 Oct. 1947. この文書は、次のDOEオープンネット・データベースの文書に含まれている。Nuclear Radiation Tolerances, 17 Oct. 1947, NV0754975.

⁴⁴ J. B. Conant to the Joint Research and Development Board, Subject: Military Application of Radioactive Materials, JRDB 88/4, 30 July 1947, NV0755642.

⁴⁵ V. Bush to L. R. Groves, Memorandum to Chief Armed Forces Special Weapons Project, Subject: Military Application of Radioactive Materials, JRDB 88/4.5, 14 Oct. 1947,

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

その他、JRDBはAFSWPに対して、軍内部で行われる次の分野の研究開発についてAFSWPが調整を行うように指令した⁴⁶。

- ・ JRDB 93/1: 放射線測定器 (radiological instruments)
- ・ JRDB 88/2: 放射線汚染除去 (radiological decontamination)
- ・ JRDB 88/3: 放射線防御装置 (radiological protective devices)

軍は、放射能戦の遂行のために必要な研究開発活動を、AFSWPの責任としたのであった。

JRDBから指令を受けたAFSWPは、1947年9月の時点で、放射線防護部門 (Radiological Defense Division) をAFSWPの技術部門 (Technical Branch) に設置した。放射線防護部門の任務は、

1. 原子爆弾のさまざまな影響の評価、
2. 放射線防護のために使用される装置の研究開発計画の評価、
3. 放射能戦の可能性の諸研究を行う、

であった。また、これらの諸任務には、開発された兵器の野外演習も含まれることになった⁴⁷。

統合参謀本部 (JCS) も、放射能戦の攻撃面と防御面の双方に可能性に強い関心をもった。JCSは、1947年12月30日付でJRDBにメモを送付し、「放射性物質の攻撃的使用とそれに対する防御方法の可能性にJCSは強い関心を持った」と述べている。次にJCSは、放射性物質を軍事目的で使用する可能性が「これまで十分に調査されてきていないように見える」とし、最後に、この放射能戦の問題を「集中的な研究の目的にし続けること」をJRDBに勧告した。JCSは、放射能戦を重視し、そのための研究を集中的に行うことをJRDBに勧告したのであった⁴⁸。

1947年末までに、戦時の科学動員や原爆開発を指揮し、戦後も軍と共に兵器開発に熱心に取り組んでいたBushとConantの働きかけによって、MEDの司令官だったGrovesがチーフを務めるAFSWPが、放射能戦の攻撃面と防御面に関

NV0755640.

⁴⁶ K. D. Nichols, Conduct of Research and Development in Radiological Warfare, Includes Draft Motion on Radiation Warfare Policy, 13 Sep. 1948, NV0757161. この文書は、後に放射能戦の研究開発に関するAFSWPの権限を強化することをCAE要請したもので、その中で、過去にJRDBがAFSWPに付与した権限について説明している。これらの指令の出された正確な日付は不明であるが、1947年の後半だと思われる。

⁴⁷ First History of AFSWP 1947-1954, Volume 1, 1947-1948, Chapter 4, Headquarters, 4.5.39.

⁴⁸ W. G. Lalor, Memorandum for The Research and Development Board, Subject: Military Application of Radioactive Materials, 30 Dec. 1947, NV0760295. このメモは、10月14日付のJRDBからのメモに対するJCSの回答である。筆者は、そのJRDBによる10月14日付のメモを入手できていないが、これまでにあげた放射能戦に関することをJCSに報告したものだと考えられる。

する研究を行うことになったのであった。

3.3. AECにおける放射能戦に対する矛盾した関心

軍が1946年末から放射能戦に関心をもち、研究開発体制の構築に向けて動き出していた一方で、放射能戦に関するAECの動きは軍よりも遅かった。AECが放射能戦の実現可能性の研究に向けて動き出したのは、軍より半年間ほど遅れた1947年5月27日であった。この日に開催された第57回AEC会議で、軍事応用部長のMcCormackが提出した放射能戦に関するメモが審議された。このメモでMcCormackは、これまで放射能戦に関する詳細な調査がなされていなかったことを指摘し、放射能戦に関する技術と効果について調査することを提案した。AECは、このMcCormackのメモをMLCへ送付することを承認した⁴⁹。

放射能戦の問題は、1947年10月3-5日に開催された、AECの組織の一つである一般諮問委員会 (General Advisor Committee, GAC) で審議された。GACは、文民の専門家で構成され、科学と技術の問題についてAECに助言する委員会である。GACの委員長は、CAEの委員でもあったOppenheimerで、CAE委員長のConantもGACの委員だった。このGACの会議において、委員長のOppenheimerは、放射能戦の問題が重要であることと、防衛だけでなく攻撃の可能性に関する研究を実行することを主張した⁵⁰。GACの委員たちは、放射能戦の研究を進めることに積極的であった。

AECの会議で放射能戦が議題に取り上げられたのは、1947年10月14日の第110回AEC会議であった。会議の前日の10月13日、AECジェネラル・マネージャー (General Manager) のCarroll L. Wilsonは、AEC委員に向けて、翌日に開催されるAEC会議の資料としてメモを提出し、JRDBが放射能戦に関する責任をAFSWPに集中させることを決定しており、その後、AFSWPに放射能戦の軍事的側面を扱う部門が設置されたことをAECの委員に伝えた。そして、Wilson

⁴⁹ 1947年5月27日のAEC会議の議事録には、放射能戦の実現可能性の研究が承認されたとは明記されておらず、McCormackのメモをMLCに転送することが承認されたとだけ記録されている。AEC Meeting No. 57, May 27, 1947, *US AEC, Minutes of Meeting 1 to 136, 1946-1947*, RG 326, Entry 19: AEC Minutes, Box 1, NARA. しかし、1947年10月13日のWilsonのメモの中に、「AECがそのような研究(筆者注:放射能戦の実現可能性の研究のこと)の実施に向けて動くということが、そのとき決められた」と書かれている。このメモの中で、「そのとき」がいつのことなのか明記されていないが、「軍事応用部長のMcCormackがAEC会議で放射能戦の実現可能性について報告したとき」と書かれているので、1947年5月27日に開催された第57回AEC会議だと考えられる。C. L. Wilson, Memorandum for the Commissioners, Subject: Radiological Warfare, 1947 Oct. 13, NV0726664.

⁵⁰ J. R. Oppenheimer, Chairman, GAC to David E. Lilienthal, Chairman, AEC, 10 Oct. 1947, RG 326, Entry 70: General Advisory Committee Minutes, Box 1, Folder 7: Sixth GAC Meeting (October 3-5, 1947 in Washington, D.C.). この会議で、放射能戦の研究の進捗状況がGAC伝えられていないとOppenheimerは発言しているが、CAEの委員でもあったOppenheimerや、Conantは、軍における放射能戦の研究についてすでに知っていたはずである。

は、放射能戦の実現可能性の問題について調査するために、軍と AEC で会議を開催することを提案した⁵¹。

10月14日に開催された AEC 会議では、前日の Wilson のメモが審議された。その結果、放射能戦の実現可能性について調査する科学者パネルを AEC が設置し、そのパネルに軍が参加することを要請することが決められ、AEC 委員長 Lilienthal から MLC 委員長の Brereton 宛に手紙⁵²を出し、そのパネルに軍が参加することを要請することが承認された⁵³。つまり、AEC の主導する科学者のパネルに、軍が参加することを要請したのであった。軍が着々と放射能戦の研究開発体制を整えつつあった状況において、AEC は、自身が研究の主導権を握ることをめざしたといえる。

Brereton 宛の手紙には、1947年初頭にオークリッジの Paul C. Aebersold, William S. Hutchinson, Jr., Karl Z. Morgan の3名によって作成された「放射能戦の実現可能性の推定」という表題の報告書が、放射能戦の背景情報として添付された⁵⁴。この報告書は、既存の研究から推定した報告書であると断った上で、放射能戦に使用する放射性物質の特徴について論じている。まず、放射性物質として、アルファ線源としてポロニウム、ベータ線源としてストロンチウム、ガンマ線源としてバリウムとランタンの混合物が、それぞれ人口密集地に対する戦略攻撃にふさわしいと結論している。また、それぞれの物質が放出する放射線の特性、大量生産できる可能性、運搬方法、散布方法について分析し、それぞれ兵器として使用することが可能であると結論している。しかし、兵器として使用する場合の今後の課題として、放射性物質と何らかの物質を混合させて、化学戦における毒ガスのような化学的・物理的性質を持つ混合物を開発する必要があると指摘している。すなわち、兵器として使用するためには散布方法に課題があり、その課題はまだ解決していないということであった。この報告書は、敵国による放射性物質の軍事使用に備えるだけでなく、まだ課題がありつつも、攻撃用の兵器として放射性物質を使用することを明確に主張していた。

AEC 委員長の Lilienthal は、この数年後に水爆開発に強く反対するようになる

⁵¹ C. L. Wilson, Memorandum for the Commissioners, Subject: Radiological Warfare, 1947 Oct. 13, NV0726664.

⁵² David E. Lilienthal, Chairman, AEC to Lt. General L. H. Brereton, MLC, Chairman, 1947 Oct. 14, NV0726660.

⁵³ AEC Meeting No. 110, October 14, 1947, *US AEC, Minutes of Meeting 1 to 136, 1946-1947*, RG 326, Entry 19, Box 1, 243-245, NARA. (DOE オープンネット文書にも議事録の抜粋がある。Radiological Warfare-AEC Meeting, 14 Oct. 1947, NV0726663).

⁵⁴ Paul C. Aebersold, William S. Hutchinson, Jr., Karl Z. Morgan, "An Estimation of the Feasibility of Radiological Warfare," NV0726662. 報告書を作成した一人の Aebersold は、アイソトープ生産の責任者であった (*Atomic Shield*, 253). Morgan は、オークリッジの保健物理学部長で、戦時中に行われた放射能戦の演習に参加していた (*Human Radiation Experiment*, 327-328). この報告書の作成された正確な日付は不明だが、Brereton 宛の手紙の中で、Lilienthal は「今年の初頭にオークリッジで準備された」と説明している。また、この報告書が AEC 軍事応用部の要請で作成されたと説明しているが、いつ要請されたのか不明である。

が、このときの放射能戦に対する態度は矛盾していた。Lilienthalは、1947年の7-8月ごろに放射能戦のことを最初に聞いたとき、「わたしは胃の中を抉られたような気がして、ほとんど病気にならなばかりだった」と、放射能戦に対して不快な感情を抱いたことを日記に記している。また、翌年の1948年5月に開催された放射能戦について調査するNoyesパネル(後述)の会議の席で、放射能戦の研究によって「恐怖時代をわれわれが作り上げることになる」と発言したこと併せて記している⁵⁵。Lilienthalは放射能戦に不安と不快感を抱いていたが、放射能戦の研究開発それ自体に対しては、積極的に反対することはなかった。

放射能戦の研究に積極的であったGACに対して、AEC委員長のLilienthalは、放射能戦に対して不安と不快感を抱いていた。しかし、AECは、軍に遅れていた放射能戦の研究開発体制の構築に向けて活動を開始した。

3.4. 放射能戦の研究開発体制の主導権をめぐるAECと軍の対立

1947年11月17日、10月14日付のLilienthalからの手紙に対して、MLCのBreretonが回答した。Breretonは、Lilienthalの手紙が送付された日と同一と10月14日に、AFSWPが放射能戦の実現可能性の継続的な研究を実行することをRDBが勧告したことを伝え、この研究を開始するために、現在AFSWPが科学者パネルの編成を計画していると述べた。そして、Breretonは、AECとAFSWPの双方がそれぞれ別々にパネルを編成すると研究の重複となるので、AFSWPの編成する科学者パネルの活動にAECが参加することを提案した⁵⁶。つまり軍は、軍の編成する科学者パネルにAECが参加することで、放射能戦の研究を軍が主導することを考えていたのであった。

1947年11月25日、AEC軍事応用部長のMcCormack将軍と、AEC生物・医学部長のShields Warren博士が、MLCの提案についてMLCと協議した。この協議の席でWarrenは、原子力法のSec. 3(A)3.で、放射性物質の軍事利用に関する研究開発活動について、AECが責任を持つと規定されていることを根拠にして、放射能戦の問題をAECの責任とすることを主張した。

Warrenの主張に対して、AFSWPチーフのGroves将軍は、AFSWPによる放射能戦に関する研究を継続するべきで、AECが、この研究に必要な科学上のアドバイスをすることを主張した。Grovesは、軍が放射能戦の研究組織を主導するべきだと考えていたのであった。

⁵⁵ Lilienthalは、1948年5月23日の日記に、この日から「おそらく9-10ヶ月前に」放射能戦について最初に聞いたと記している。リリエンソール(末田守、今井隆吉訳)『リリエンソール日記III』(みすず書房、1969年):211頁(原題: *The Journals of David E. Lilienthal, Vol. II, the Atomic Energy Years 1945-1950* (Harper & Row, 1964): 349.)

⁵⁶ 10月14日付のLilienthalの手紙と同日に、JRDBがAFSWPに対して放射能戦のための科学者パネルを設置することを勧告したのは、偶然ではなく、軍がAEC主導の科学者パネルに対抗したと考えるのが自然であろう。L. H. Brereton, Lieut. General, USAF, Chairman, MLC to David E. Lilienthal, Chairman, AEC, 17 Nov. 1947, RG 326, Entry 1: Office Files of David Lilienthal, Subject Files, 1946-1950, Box 9, Folder: Correspondence MLC 1947, NARA.

AEC と軍の責任の分担について Warren と Groves が意見を対立させた中、McCormack が妥協案を提示し、AEC と AFSWP のそれぞれの組織が互いに密接に連絡しつつ、AEC と AFSWP がそれぞれ計画を進めることを提案した。結局、MLC は 1947 年 11 月 17 日付の Lilienthal 宛の手紙を撤回し、その妥協案に合意した。

その後、12 月 8 日、Groves は AEC に対して、放射能戦の実現可能性の研究を行う研究グループを AFSWP が設置することを伝え、この研究を進める上で、民間科学者の助言が必要になると説明した。また、研究の進捗状況を AEC に伝えると述べた。Groves からの提案に対して、AEC は、12 月 24 日に、AEC の生物学・医学諮問委員会 (Advisory Committee on Biology and Medicine, ACBM) の委員長の Franklin C. McLean 博士を責任者とするプロジェクトを設置することと、AEC におけるこのプロジェクトの状況について AFSWP に伝え続けることを伝えた⁵⁷。

結局、11 月 25 日の McCormack の妥協案に沿って、軍と AEC は、放射能戦に関して、研究の主導権をどちらが握るのか争いつつも、それぞれが研究活動を行い、相互に情報を交換することになった。

3.5. AEC による放射能戦の実現可能性の研究の提案

1948 年 2 月 4 日、第 148 回 AEC 会議で、今後の放射能戦研究のために、軍事応用部長と生物学・医学部長の協力で作成された「軍事目的のための放射性物質の応用」(以下、AEC 28 とする) が審議された⁵⁸。会議の冒頭で、この AEC 28 は、放射性物質の軍事的応用に関する政策や計画の承認を勧告するのではなく、研究開発のための初期計画を、AEC の GAC と ACBM に転送することの承認を勧告するものだと説明された⁵⁹。AEC 28 は、早急に放射能戦の研究開発を実行するのではなく、その実現可能性について、事前に十分に調査することを提案したのであった⁶⁰。

⁵⁷ 放射能戦の科学者パネルに関する AEC と軍の対立と妥協について、放射能戦の研究開発について勧告した AEC 28 文書 (後述) の経過報告の中で説明されている。Report by the Director of Military Application in Collaboration with the Director of Biology and Medicine - Application of Radioactive Materials for Military Use, AEC 28, NV0726658.

⁵⁸ NV0726658 文書に "AEC 28" と明記されていないが、1948 年 2 月 4 日の AEC148 回会議の議事録にあった AEC 28 文書の表題と作成者、および文書の内容から、NV0726658 文書が AEC 28 文書だと筆者は判断した。

⁵⁹ Meeting No. 148, February 4, 1948, *US AEC Minutes of Meeting, 137 to 190, 1948*, RG 326, Entry 19, Box 2, NARA. この日の AEC の議事録には、AEC 28 について議論がなされたと書かれているが、その議論の内容については何も書かれていない。

⁶⁰ 諮問委員会の取り組む課題として、AEC 28 は次の 10 項目を挙げた。(1) 放射線の医学・生物学的効果。これには、農作物や食物に対する効果も含まれる。(2) 広範囲を放射能で段階的に汚染し、そこで生活する動物 (羊、ヤギ、豚など) や植物を観察する。(3) 放射性物質の生産能力、分離プロセス、保管、シールド、放射性物質の選択について。(4) 戦術および戦略的使用と、その散布方法を探求する。放射能戦に対する国の脆弱性やその "主要な効果" について予測する。潜在的な敵国の情報を収集する。(5) 放

AEC 28 は、放射能戦を実行するために必要な様々な事項について研究するために諮問委員会を設置することを提案し、最後に、「AEC は、軍事使用のための放射性物質の応用の分野における科学と技術の調査と研究を加速するべき」と結論し、AEC 28 を GAC に審議させることになった。

AEC 28 は、1948年2月6-8日に開催された第8回 GAC 会議で審議された。会議における GAC 委員の意見は、AEC が放射能戦研究の責任を担うことに懐疑的なものであった。

GAC 委員の Conant は、放射性物質の軍事的応用を加速すべきという AEC 28 の勧告に同意したくないと述べた。Conant は、その理由の一つとして、放射性物質の運搬と散布の方法が問題であることをあげた。Conant は、この問題は化学戦においても十分な成功をしていないので、放射性物質でも同じような困難があると指摘した。また Conant は、放射能戦の提案は、純粋な軍事的な問題であるとも主張した。GAC の役割は科学的な助言をすることなので、GAC の役割を超えていると Conant が考えていたのであった。

GAC 委員長の Oppenheimer は、Conant と同様に、GAC には戦術的な問題についてコメントする適切な能力がないことと、放射能戦にとって決定的な問題は、放射性物質の散布方法であると述べた。また、Oppenheimer は、放射性物質の生産の計画と、放射線の影響に関する生物学研究の計画が緊急な課題ではないとして、AEC がそれらの責任を担うことに疑問を提起した。Conant は、この Oppenheimer の意見に同意し、軍が放射能戦の実現可能性を調査する主要な責任を担うべきと主張した⁶¹。

Conant は、軍が放射能戦の研究を行うべきだと考えていたので、AEC が放射能戦の研究を行うことに積極的でなかったのだと思われる。Conant と Oppenheimer は、軍が放射能戦の研究を進めることを提起した CAE の委員であったので、放射能戦の研究を行うことそれ自体に消極的だったとは考えられない。彼らは、放射能戦の問題が、散布方法の開発や戦術上の問題であるとみなしていたので、これらが AEC ではなく軍の責任であると考えていたのであった。

GAC は、2月11日付で Lilienthal に意見を送付した。GAC は、戦闘に放射性物質を利用する可能性の現在の状況を検証し、散布の問題に関する提案や兵器

放射性物質の運搬方法について研究する。(6) 放射性物質の散布方法について研究する。化学戦や生物戦で一般的なエアロゾルが効果的である。化学隊がこのエアロゾル計画を補佐する。(7) 兵器の設計について。(8) 野外演習について。(9) 汚染除去について。(10) 防御方法について。また、AEC 28 には、放射能戦の研究開発を実行する機関として、AEC の国立研究所や軍の研究機関の他に、AEC と契約しているシカゴ大学、ロチェスター大学、UCLA、パークレー、デイトンといった民間の大学があげられており、最後に、"NRC - Atomic Casualty Commission (Japan)" と、日本の被爆者を調査していた機関もあげられている。日本の被爆者に関する情報も、放射能戦の研究に関する研究機関の一つとして位置づけられていたことを示唆している。

⁶¹ J. H. Manley, Secretary, GAC, Draft Minutes, Eighth Meeting of the General Advisory Committee, February 6-8, 1948, RG 326, Entry 70, Box 1, Folder 11: Eighth GAC Meeting (February 6-8, 1948 in Washington, D.C.), NARA.

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

の有効な野外テストを提案するため、科学者と軍人で構成されたパネルを創設することを勧告した。そしてGACは、このパネルが放射能戦に関する勧告書を作成し、その後、AECの計画を決定するべきだと主張した⁶²。

AECは、放射能戦の研究開発を早急に開始するのではなく、事前に十分調査することが必要だと考えていた。軍が放射能戦の研究開発に加わることを支持していたGACは、科学者と軍による合同パネルを設置して、AECの主張していた放射能戦の実現可能性について十分に調査することを提案したのであった。

4. 放射能戦の研究開発計画とAECと軍の責任の分担

4.1. 軍によるAECとの責任分担の提案

1948年2月18日、AFSWPの放射能戦研究グループは、放射能戦の研究計画を議論するために、Los Alamos研究所で会議を開催した。この会議には、科学者1名を含むAFSWPの代表が13名、空軍から1名、AECの科学者が4名参加した。

この会議の準備したのは、AFSWPのコンサルタントでもあったAECのMcLeanであった。McLeanは、自身の意見はAECの公式見解ではなく個人的な見解であることを強調した。つまり、この会議は、AECの了解を得たものではなかったのであった。この会議でMcLeanは、放射能戦に関するAECの研究グループがまだ存在していないことを指摘した。

AFSWPのScoville博士は、今後の放射能戦の研究計画について説明した。Scovilleは、放射能戦に関する研究開発の分野ごとに専門のパネルを設置し、それぞれ、AECと軍(AFSWP)のどちらの主導で運営されるのかを提案した。Scovilleの提案したパネルとその役割は以下の通りである。

1. 放射性物質の生産パネル (AEC 主導)
2. 医学・生物学パネル (AEC 主導)
3. 運搬パネル (AFSWP 主導)
4. 戦術・戦略使用パネル (AFSWP 主導)
5. 防御パネル (AFSWP 主導)
6. 情報パネル (AEC 主導)

この1.は放射能戦で使用できる放射性物質の生産、保管、物理・化学的特性について研究するパネルである。2.は、放射線の効果や許容量について研究するパネルで、6.は、敵国の状況を調査するパネルである。これら1, 2, 6.はAECによって主導されるとされた。3.の運搬パネルは、放射性物質の散布方法や、兵器として使用するために必要な特性、および、保管や運搬を安全に行う方法について研究するパネルである。4.は、放射能戦に必要な効果や、適切な標的、戦闘における有効性について研究するパネルである。5.は、放射性物質から防

⁶² J. R. Oppenheimer, Chairman, GAC to David E. Lilienthal, Chairman, AEC, 11 Feb. 1948, RG 326, Entry 70, Box 1, Folder 11: Eighth GAC Meeting (February 6-8, 1948 in Washington, D.C.), NARA.

御するためのマスクや衣服、汚染除去のための方法、放射線検出装置の研究について研究するパネルである。これら3, 4, 5, はAFSWP, すなわち軍によって主導されるとされた。Scoville博士の提案した、放射能戦の研究開発における軍とAFSWPの責任の分担について、会議の出席者全員が合意した⁶³。

この会議はAECの正式な了解を得て開催されたものではなかったが、McLeanの積極的な協力を得たAFSWPの主導で、事実上、放射能戦の研究に関するAECと軍の責任の分担の基礎が定められたのであった。

4.2. 軍とAECによる合同放射能戦研究：Noyesパネルの設置

1948年3月17日、第158回AEC会議で、「AEC 28/1: 放射性物質の軍事的応用」(以下、AEC 28/1とする)が審議された⁶⁴。

AECは、前年の1947年10月14日付で、MLC委員長のBrereton将軍に、AECの設置する放射能戦研究パネルに軍が参加することを要請した手紙を撤回することに合意した。AECは、AEC主導の科学者パネルに軍が参加するという形式を撤回したのであった。

その理由として、軍の中で放射能戦の研究開発の責任を担うAFSWPが、AECの提案に賛成しなかったからだとAEC 28/1に記されている。AECの主導で放射能戦の研究を行うことを、AFSWPが拒否したため、AECは自身の意見を撤回したのであった。

AEC 28/1は、科学者のパネルを設置するというGACの勧告に従って、AECと軍の合同のパネルを設置することを提案した。合同とは、軍とAECのどちらかが主導するのではないことを意味している。パネルの委員は、MLCの支援と補佐を受けてAECが任命することになった。ただし、「軍事利用のための放射性物質の応用におけるAECの研究開発計画の最終的な決定を、このパネルの勧告を受理するまで延期する」とされた。つまり、放射能戦の研究開発を実行するかどうかの最終的な決定は、このパネルの勧告を受けてから行うことになったのであった。実戦で使用することを視野に入れた具体的な放射能戦の研究計画を進めようとする軍やMcLeanと異なり、AECは軍ほど積極的ではなかったといえる。AECは、若干の文言の修正だけでAEC 28/1を承認した⁶⁵。

AEC 28/1の勧告が承認されたことで、軍-AEC合同放射能戦パネル(Joint NME-AEC Panel on Radiological Warfare)が設立された。このパネルは、委員長に任命されたW. A. Noyes, Jr.博士の名前をとって、Noyesパネルと呼ばれた。Noyes

⁶³ Minutes of Meeting of Armed Forces Special Weapons Project Radioactive Warfare Study Group, 1948 Feb. 18, NV0755715.

⁶⁴ AEC Meeting No. 158, March 17, 1948, *US AEC, Minutes of Meeting 137 to 190, 1948*, RG 326, Entry 19, Box 2, NARA. この会議の出席者の名簿にLilienthalの名前がないが、欠席の理由について何も書かれていない。

⁶⁵ Report by the Program Council, "Application of Radioactive Materials for Military Use," NV0726650. この文書は、AEC会議の2日前の3月15日に、AEC委員らに配布された。NV0726649文書に"AEC 28/1"と明記されていないが、文書のタイトル、および文書の内容から"AEC 28/1"だと判断した。R. B. SNAPP, Note by the Secretary, "Application of Radioactive Materials for Military Use," AEC 28/1, 1948 Mar. 15, NV0726649.

パネルの目的は、放射能戦の可能性の調査を行い、研究開発計画について AEC と軍に勧告することとされた。Noyes パネルの委員には、委員長の Noyes の他に、E. O. Lawrence 博士、W. M. Latimer 博士、McLean、E. P. Stevenson 博士、W. M. Manning 博士と、MLC 委員である J. H. Hinds 陸軍大佐が任命された。また、Noyes パネルの書記官 (Secretary) として、McCormack が就任した⁶⁶。

4.3. Noyes パネルの勧告

1948 年 5 月 23 日、第 1 回 Noyes パネルの会議が開催された。会議では、AEC と軍が共同で、放射性物質を軍事目的で応用する可能性を評価する報告書を作成し、8 月 29 日に開催される第 2 回会議でその報告書を提出することになった⁶⁷。

予定どおり 1948 年 8 月 29 日に開催された第 2 回 Noyes パネルの会議では、第 1 回 Noyes パネル後の 6-8 月に行われた放射能戦に関する研究の概要が説明され、今後の研究開発計画について作成された、15 項目の勧告が全会一致で採択された⁶⁸。この勧告を作成するための研究は、AEC と契約している大学や国立研究所、軍傘下の研究機関など、様々な機関の協力で行われた⁶⁹。また、AFSWP が軍と AEC の間の連絡を担当した。

勧告の主な内容をまとめると、次のようになる。

1. 2 年以内に放射性物質の散布方法を開発する。
2. ガンマ線を放出する兵器の開発に主要な関心を向ける。
3. 軍は、放射性物質の散布方法を開発する主要な責任を担う。
4. AEC は、放射性物質の生産や生物学的影響の研究の責任を担う。
5. 防御、検出、汚染除去の方法の開発の責任を適切に割り当てる。

⁶⁶ "Radiological Warfare Staff Study, June-August 1948, Presented to the Joint NME-AEC Panel on Radiological Warfare," 29 August, 1948, NV0726620.

⁶⁷ 筆者は、この第 1 回 Noyes パネルの会議の議事録を入手できていない。この日の Noyes パネルの内容や Noyes パネルの目的について、1948 年 10 月 19 日に AEC に承認された AEC 28/8 文書 (後述) の背景説明の記述に依拠した。

⁶⁸ "Radiological Warfare Staff Study, June-August 1948, Presented to the Joint NME-AEC Panel on Radiological Warfare," 29 August, 1948, NV0726620. この文書に、第 2 回 Noyes パネルの会議の勧告と付属文書、会議の議事録がまとめてある。

⁶⁹ 当時、原子爆弾被害調査委員会 (ABCC) によって収集されていた日本の被爆者たちのデータが、放射能戦の研究に利用されていた可能性がある。1948 年 6 月 16 日付で、参謀本部の S. V. Hasbrouck 大佐は JCS に対して、被爆者たちの追跡調査から得られたデータの重要性を指摘して、それらのデータが、「現在の AFSWP の放射能戦の研究にとって重要な情報を与える。特に ... (略) ... 放射性汚染物質の攻撃的使用から予想される被害者に関する情報を与える」と述べている。ただし、ABCC のデータが、実際に AFSWP に渡されたかどうか、筆者は確認できていない。S. V. Hasbrouck, Colonel, FA, Chief of Staff to Joint Chiefs of Staff, "Memorandum for the Joint Chiefs of Staff, Subject: Studies being Made on Survivors of the Atomic Bombings in Japan," 16 June 1948. この文書は、L. R. Groves, Atomic Bomb Casualties (at Hiroshima and Nagasaki and the Implications for American Cities), NV0767680 に含まれている。

勧告では、核兵器用の放射性物質の生産が優先されるので、少なくとも2年間は、放射能戦兵器に使用する放射性物質を大量に生産するために必要な施設を十分に建設できないとされた。兵器に使用する放射線の種類について、ガンマ線ならば、アルファ線とベータ線の場合のような経口摂取や吸入の必要がないので、ガンマ線を放出する物質が兵器にふさわしいとされた。散布方法としては、直径100 μ mのエアロゾルでは気象条件に左右され、標的に命中させるのが困難なので、実現可能性はないとされた。その代わりに、直径1mmの粒子が実現可能であるとされた。放射能戦で使用する弾薬について、すでに陸軍の化学隊が実験を行っており、散弾銃用弾丸クラスター (shotgun shell cluster) が最も実現の可能性があるとして報告された。研究開発の責任の分担については、防御、検出、汚染除去の方法の開発の責任は明確にされなかったが、放射性物質の生産や放射線による生物的影響に関してAECが責任を担い、放射性物質の散布方法について軍が責任を担うことが勧告された⁷⁰。

軍とAECの責任の分担を明確に勧告したNoyesパネルの報告書は、AECと軍の双方に送られ、それぞれが対応を迫られた。

4.4. 放射能戦の研究開発におけるAFSWPの責任の明確化

第2回Noyesパネルの報告書が提出されてから約2週間後の1948年9月13日、この年の2月に退役したGrovesの後を継いでAFSWPのチーフに就任していたNicholsが、放射能戦の研究開発のために、AFSWPの権限を強化することをRDBに要請した。

Nicholsは、AFSWPのチャーターで、AFSWPが原子兵器 (atomic weapon) 開発に参加すると規定されており、この規定には、放射性物質の攻撃的応用の開発にAFSWPが参加することが含意されていると指摘した。しかし、Nicholsは、AFSWPが放射能戦の開発に参加することをもっと明確にするべきであると主張した。

⁷⁰ 第2回Noyesパネルの勧告をまとめると次の通りである。

- 放射性物質の生産能力と散布方法の開発が十分でないため、今後少なくとも2年間、攻撃用の放射能戦兵器の使用は不可能である。しかし、2年くらいで、放射性物質を使用して特定のエリアや施設に侵入できなくさせることを実現可能にするべき。2年以内に散布方法を開発する。(勧告1, 2, 3, 8)
- 研究の主要な関心を、ガンマ線を放出する攻撃用の兵器の開発に向ける。放射性物質として、Ta (タンタル)、Zr (ジルコニウム)、Cb (コロンビウム)が適切である。(勧告4, 5, 11)
- 放射性物質の散布方法を開発するための主要な責任を、軍 (NME) に委任するべき。軍はその開発の責任を、様々な部署との調整を保証できるレベルにおく。(勧告6, 7)
- 防御、検出、汚染除去の方法の開発を適切に割り当てる。(勧告9)
- AECは、放射性物質の生産や生物学的影響の研究の責任を担う。(勧告10, 11)
- 1949年に計画全体の見直しを行う。(勧告13)
- 機密の区分を変更し、軍などが適切に計画を遂行できるようにする。(勧告14)
- 1948年12月6日に次回の会議を開催する。(勧告15)

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

また、Nichols は、AFSWP が、RDB から JRDB 93/1, JRDB 88/3, JRDB 88/2, JRDB 92/1 の指令を受け、軍内部における放射能戦の研究について調整する責任を担っていたが、Noyes パネルからの勧告を実行するために、AFSWP の権限のさらなる強化を要請した。Nichols は「攻撃的な放射能戦と放射線防御の両分野」において、活発で継続的な研究を保証するために、軍内部における放射能戦に関する研究開発に関する予算を評価し、それらに関する RDB に対する勧告を作成する権限を AFSWP に付与することを要請した⁷¹。

1948 年 11 月、RDB は、Nichols の要請について、AFSWP に新たな権限を付与することをしないとしつつ、また、AFSWP に CAE の役割のすべてを委任したわけではないことと、CAE との連絡を維持するという条件をつけたうえで、Nichols の要請を基本的に承認した⁷²。

Noyes パネルの勧告を実行するために、放射能戦の研究開発活動における AFSWP の責任が明確にされると共に、軍の内部における AFSWP の権限が、事実上、強化されることになった。

4.5. 放射能戦の研究開発における軍と AEC の責任の分担の決定

1948 年 10 月 11 日、Noyes パネルの報告書を受けて、AEC 秘書官 (Secretary) の Roy B. Snapp が、AEC の取るべき行動をまとめた報告書である AEC 28/8 の草稿を、10 月 13 日に開催される第 204 回 AEC 会議で審議するために AEC 委員に送付した⁷³。

AEC 会議の当日、Snapp は AEC 委員に対して、AEC 28/8 が、放射性物質の散布方法や、放射能戦の防御、検出、汚染除去の方法の開発の主要な責任を軍が担うとしていることについて、これは、1946 年原子力法で定められた AEC の責任に関わる問題であると指摘した。AEC 28/8 は、原子力法によって AEC の責任とされた放射性物質の軍事利用の一部を、軍に委ねることを意味していたのである⁷⁴。

⁷¹ K. D. Nichols, "Conduct of Research and Development in Radiological Warfare, Includes Draft Motion on Radiation Warfare Policy," 13 Sep. 1948, NV0757161.

⁷² 1948 年半ばから 1950 年ごろまでの CAE の議事録が、米国立公文書館の RG 330, Entry 341, Box 77, Folder 3: 3 Minutes AE においてほとんど公開されていないため (2008 年に確認)、この 9 月 13 日の Nichols の勧告が、いつ CAE および RDB に承認されたのか、筆者は確認できていない。しかし、次の文書に含まれる Nichols から CAE 宛のメモで、9 月 13 日の自身の要請が RDB に最終的に承認されたと Nichols が説明している。Radiological Decontamination, Agenda Item for CAE-RDB Meeting of 17 December 1948, 1948 Dec. 13, NV0757201。また、1949 年 10 月 9 日に開催された第 4 回 Noyes パネルの勧告について議論するために Nichols が作成した次の状況報告の中で、第 2 回 Noyes パネルの勧告について RDB がどのような行動をとったのかについて解説し、この Nichols の要請が承認されたことを記している。Radiological Warfare Program Status Report of the Joint AEC-Department of Defense Panel on RW, 9 October 1949, 1949 Nov. 22, NV0760292。

⁷³ R. B. SNAPP, Note by the Secretary, Subject: Radiological Warfare, 1948 Oct. 11, NV0726610.

⁷⁴ Roy B. Snapp, Secretary, "Radiological Warfare - Comments of the General Counsel," 1948

AEC 会議において、Wilson が、AEC 28/8 で提起された計画が試用期間において適切なものであり、この試用期間の最後で、再度、放射能戦の可能性を評価することを主張した。AEC は、Wilson の意見に従って、28/8 を修正することを要請した。AEC は、放射能戦の研究自体を批判することはなかったが、早急な研究に慎重であったのである⁷⁵。

Wilson は、AEC 軍事応用部に対して、AEC 会議の議論に従って AEC 28/8 を修正して再提出するように要請した⁷⁶。

AEC 28/8 の修正箇所案 (AEC 28/10) が作成され、10月18日に AEC に提出された。AEC 28/10 は、13日の AEC 会議の勧告に従って、「放射性物質の軍事的使用の可能性は、さらなる研究と開発の後に再評価させる」という文言を AEC 28/8 に加えることを提案した。また、「軍が放射性物質の散布方法や、放射能戦の防御、検出、汚染除去の方法の開発の主要な責任を担う」という箇所に、「軍事作戦に関する」という文言を新たに加えることを提案した。つまり、AEC は、軍の開発活動を、「軍事作戦に関する」ことに制限しようとしたのであった⁷⁷。

翌10月19日に第208回 AEC 会議が開催され、AEC 28/8 の修正案 (AEC 28/10) が審議され、AEC 28/8 の修正稿が採択された⁷⁸。会議では、軍事応用部長の McCormack が、放射能戦に関する軍の開発活動に「軍事作戦に関する」という文を加えることについて、「軍に属する機能を過渡に制限するかもしれない」と批判した。結局、「軍事作戦に関する」の文言は修正稿に入らないことになった。AEC 内における軍の代表でもあった McCormack は、軍の行動に制限が加えられることを認めることができなかったのである。

さらにこの日の AEC 会議では、AEC 28/10 で提起された、「放射性物質の軍事的使用の可能性は、さらなる研究と開発の後に再評価させる」の文言が加えられることが承認された。さらに AEC 会議では、「使用のために大量の放射能戦物質が生産される前に、新たな決定がなされる」の文言を加えることが承認

Oct. 13, AEC 28/9, NV0726608.

⁷⁵ AEC Meeting No. 204, October 13, 1948, *US AEC, Minutes of Meeting 191 to 227 and Notes on Conference, 1948*, RG 326, Entry 19, Box 2: Vol. 2-3, 5, NARA.

⁷⁶ Memo to Director of Military Application, Subject: Commission Action on AEC 28/8 - Radiological Warfare, 1948 Oct. 15, NV0726556.

⁷⁷ R. B. SNAPP, Note by the Secretary, Subject: Memorandum to Holders of AEC 28/8 Radiological Warfare, 1948 Oct. 18, AEC 28/10, NV0726609.

⁷⁸ 米国立公文書館において、この日の AEC 会議の議事録 (AEC Meeting No. 208, October 19, 1948, RG 326, Entry 19, Box 2) はアクセスが制限されており、筆者は閲覧することができなかった (2008年8月)。しかし、DOE オープンネット文書から、この日の議事録のうち、放射能戦に関する部分の抜粋を入手できた。"AEC 28/8 And AEC 28/10 - Radiological Warfare," 1948 Oct. 19, NV0726554. 採択された AEC 28/8 は、DOE オープンネット文書の NV0726553 だと考えられる。この文書には AEC 28/8 と書かれていないが、AEC 会議の議事録にある AEC 28/8 とタイトルと作成者が同一であることと、文書そのものの内容から、この文書が AEC 28/8 だと判断した。ただし、修正案 (AEC 28/10) に従って内容が修正されているので、AEC に承認された後の AEC 28/8 文書だと思われる。Report by the Program Council, Subject: Radiological Warfare, AEC 28/8, NV0726553.

第2次大戦後の米国における放射能戦の研究開発体制の成立過程

された。放射能戦で使用する放射性物質を大量生産するかどうかはまだ決定されたわけではなく、大量生産を行うためには、また新たな決定を必要とするとされたのであった。

放射能戦の研究開発における軍と AEC の間の責任の割当てについては、次のように、ほぼ Noyes パネルの勧告に従うことが同意された。

1. 軍は、放射能戦兵器の散布手段の開発の主要な責任を負う。
2. 軍は、防御手段、検出手段、汚染除去手段の開発の主要な責任を負う。
3. AEC は、放射能戦で使用する放射性物質の生産と、放射能戦に関する生物学的・医学的観点に関する計画全体の主要な責任を負う。

原子力法の規定では AEC が責任を担うことになっていた、放射能戦の研究開発の責任の一部を軍が担うことが、この日の AEC 会議で正式に承認されたのであった。

この AEC 会議で採択された AEC 28/8 の修正稿では、放射能戦について、慎重な AEC の姿勢が明確に示されているといえる。AEC は Noyes パネルの結論について、パネルが 2 年以内に放射能線兵器を開発できると信じていると指摘した一方で、放射能戦の広範な可能性は、AEC にはまだ明確に答えることができないように見えると述べ、放射能戦兵器の開発に積極的な Noyes パネルに対して、AEC は慎重な態度を示している。放射能戦に対する AEC の慎重さは、AEC 28/8 の修正案と同時に承認された AEC から MLC へ報告する手紙の中で、より明確にされている。AEC には放射能戦の採用を早計に判断する意図はないと述べ、その理由として AEC は、まだ兵器が開発されていないこと、放射性物質を生産する能力の開発がまだ解決していないこと、放射能戦のための軍事計画が立案されていないことをあげている。また、放射性物質を兵器として使用する決定に関わる「広範な政治問題」が未解決であるとも述べている。AEC は、放射能戦の問題を単なる技術上の問題としていたのではなく、「広範な」問題に関わっていると考え、放射能戦に対して慎重な態度をとっていたのであった。

4.6. その後の放射能戦の研究開発

その後、軍と AEC で放射能戦に関する研究開発が行われた。放射性物質を散布する野外演習は、主に Dugway 試験場 (Dugway Proving Ground) で、陸軍の化学隊によって実行された。放射性物質を砲弾として使用する実験も行われた。軍事的に必要な効果を引き起こすために必要な放射線量の研究も行われた⁷⁹。

1952 年 8 月 8 日に、国防省と AEC の合同研究グループの名前で、それまでに行われた放射能戦に関する研究開発の報告書が作成され、10 月 22-23 日に開催された第 29 回 CAE 会議に提出された⁸⁰。この報告書の結論は次のようにまとめ

⁷⁹ 『放射線人体実験報告』は、放射能戦の研究のために人体実験が行われたという証拠はないと結論している。 *Human Radiation Experiments*, 326-328. 筆者もこれまでそのような証拠を発見していない。

⁸⁰ Joint DOD-AEC Ad Hoc Study Group on Technical Aspects of Radiological Warfare,

られる。

1. 1953年1月1日までに、 $Zr^{95}-Nb^{95}$ を生産する施設を建設する決定を行えば、1956年末までに、1日あたり1.3メガキュリーを生産できる。
2. 1機の航空機で $Zr^{95}-Nb^{95}$ を散布して、3-4平方マイルの領域を15メガキュリーで汚染できる。また、10-25平方マイルの領域を、1平方マイルあたり5メガキュリーで汚染できる。
3. 適切な対抗手段を用いることで、人々の暴露率を50-80パーセント削減できる。
4. 放射線に対する人間の感受性は、年齢、健康状態、暴露率で変動するため、正確な予測を行なうのは困難であるが、ガンマ線による生物的效果に関するデータは十分に正確である。

報告書は、放射能戦の軍事的価値を早急に決定するべきことと、それまで研究開発計画を現在の水準で維持するべきと勧告した。

しかし、攻撃を想定した放射能戦の研究は中止されることになった。1953年に大規模な放射能戦の演習を行うことが計画されていたが、結局、それは中止となった⁸¹。

また、1953年に、放射能戦で使用するための放射性物質を大量に生産しないことになった。JCSがAECに対して、放射能戦に使用する放射性物質の生産のための予算を、1954年のAEC予算に組み込むことを勧告したが、AECがその勧告を却下したためである⁸²。

放射能戦の研究開発費も大幅に削減された。1953会計年度に267万7000ドルだった放射能戦の研究開発費は、1954会計年度に32万5000ドルとなった。また、1955会計年度には、攻撃用の放射能戦の研究開発費が計画されないことになり、放射線に関わる人員の訓練、放射線の検出、汚染の除去といった、放射線からの防御のための予算が、放射能戦の研究開発計画として含まれることになった⁸³。

"Technical Aspect of Radiological Warfare Status Report as of 8 August 1952," AFSWP-432, RG 330, Entry 341, Box 77, Folder 1: 2/28 thru Agenda AE, NARA.

⁸¹ 『放射線人体実験報告書』は、攻撃用の放射能戦兵器の開発が中止された理由は完全に明らかにされていないとしつつ、次の2つの理由をあげている。1. 朝鮮戦争が停戦し、その後に国防費全体が削減されたこと。2. 1953年までに化学隊だけしか放射能戦計画に強い関心を持っていなかった。 *Human Radiation Experiments*, 327.

⁸² K. D. Nichols, Major General, GS, Chief of Research and Development to Mr. Walter G. Whitman, Special Assistant to the Secretary of Defense, "Army FY 1954 Radiological Warfare Program," 14 July 1953, RG 330, Entry 341, Box 434, Folder 1: 200/ RDB-AE, NARA. AECが放射能戦で使用するための放射性物質を生産しないことになった理由について、筆者は明らかにできていない。今後の課題としたい。

⁸³ Donald A. Quarles to Sterling Cole, RD 265/1, 9 Dec. 1953, RG 330, Entry 341, Box 437, Folder 5: 100 Atomic Energy Radiological Warfare, NARA; *Human Radiation Experiments*, 327.

放射能戦の研究開発は、1950年半ばまでに、攻撃のための研究が中止され、遮蔽や汚染除去などの放射線からの防御のための研究に重点が移されることになった。

5. 結論

第2次世界大戦の終結後、原子力の文民管理を定めた原子力法が制定され、戦時中に原子爆弾を開発した陸軍のMEDの資産がAECに引き渡された。その結果、米国の核開発体制における軍の影響力はきわめて弱体化したといえる。

しかし、戦時中の科学動員や核開発を指揮し、戦後も民間科学者と軍が協力して兵器開発を行うための制度をつくる活動に従事していたBushやConantと、AEC設立後も軍が核開発を行い続けることを意図していたGrovesらが再び集結し、核開発における軍の立場を強化するために奮闘した。

放射性物質を兵器として使用する放射能戦の研究開発は、原子力法の規定にもあったように、本来、AECがその責任を担うことになっていた。しかし、Bush、ConantとGrovesらは、AECよりも早く、軍の組織が放射能戦の研究開発を行うために動き出した。戦後、軍全体の研究開発活動の調整を任務とする軍の研究開発委員会(JRDB)の委員長となったBushは、その下部組織である原子力小委員会(CAE)の委員長となったConantとともに、GrovesがチーフとなったAFSWPが放射能戦の研究開発を行う体制を構築した。

軍に遅れをとったAECも、放射能戦の研究に向けて動き出した。AEC委員長のLilienthalは、放射能戦に対して不安や不快感を抱きつつも、放射能戦の研究それ自体に反対することはなかった。

1948年末までに、AECと軍の間で、放射能戦の研究開発における責任の分担が定められた。AECは、放射性物質の生産や、人体に対する放射線の影響に関する研究の責任を担うことになり、軍は、放射性物質の散布方法、放射性物質の検出方法、汚染除去のための方法の開発の責任を担うことになった。軍の役割は限定されていたが、本来、AECがすべての責任を担うはずだったことを考慮すれば、放射能戦の研究開発を通じて、核開発における軍の責任が拡大したといえる。

放射能戦の研究開発は、攻撃用の放射能戦兵器の開発が事実上中止され、放射能戦の防御面の研究に縮小され、軍の努力は無駄になったように見える。しかし、放射能戦の研究開発体制において、軍がその責任の一部を担うことになったことは、核開発全体を強力に管理する文民管理のAECの下で、軍が自身の勢力を拡大させ、自身の発言力を強化させるための一つの機会を与えることになった。

研究ノート

米軍が接收海中投棄したサイクロトロンと 阪大には2台と記録された根拠

福井崇時*

§1. はじめに

戦後、米軍が日本のサイクロトロンを接收し海中に投棄したが、この行為に関して、米国公文書に「大阪帝国大学には2台」と誤って記録されている。この間違いを我々当事者は訂正していない。この誤った米国公文書の記録を基にされたと思われる記述もある^[1,1]。「2台目は何か」の話は、菊池正士先生没後に記念事業が編集刊行した本^[17]に記述があるが、非売品のため関係者でなければその本の存在は判らぬと思われるので、本稿で紹介したい。

接收前に大学に来た米軍兵士らと接し、軍属を研究室へ案内されている菊池正士先生らの横にいた筆者の記憶から、この間違いの経緯を明らかにする。

GHQ/SCAPにサイクロトロン破壊を指令した伝達に齟齬があった事情については、既に小沼、山崎等諸氏により論じられている^[1,1-1.6]が、阪大には2台のサイクロトロンがあったと記録するに至る経過をみる便宜上、それらを簡単に記しておく。

理研の200トン・サイクロトロン建設にあたり設計青図をローレンスから貰ったと記録されていた^[26,27]が、最近それは事実ではないことが判明したので、この経緯も述べる。

§2. 接收決定までの連合軍最高司令官総司令部 GHQ/SCAPの動き

2.1. 科学情報調査団、原爆調査団と指令第3号

連合軍最高司令官総司令部 GHQ/SCAPの日本の原子核研究への対応は、昭和20(1945)年9月に、K・T・コンプトン (Karl T. Compton) とE・L・モーアランド (E. L. Moreland) を団長とする科学情報調査団 (Scientific Intelligence Survey to Japan) (アルソスALSOS) と、T・F・ファーレル (T. F. Farrell) 准将 [後にJ・B・ニューマン (J. B. Newman) 准将と交替] を団長とする原爆調査団 (Atomic Bomb Mission Japan) とを組織し並行して調査を行った。広島大学の市川は、公開されたマイクロフィルム資料から、調査団の行動と記録を詳細に調べて報告した^[2,1]。アルソスは原爆調査を直接行わず、原爆調査団にまかせた。アルソスは、理研と東大を調査し、11月1日に団長コンプトンが長文の報告書を提出した^[2,2,2.3]。原爆調査団は理研、東大、京大、阪大を調査し、11月初めに団長ファーマンが報告した^[2,4]。このファーマン報告原案は、団員のフィリップ・モリソン (Phillip Morrison) が書いた^[2,5]。

GHQ/SCAPは9月22日付で日本政府に「指令第3号」^[3]を発し、その第8項で、原子核研究の実験所及び研究所での作業の報告と占領軍査察の受け入れを要求

* 名古屋大学名誉教授 (物理学)

し、ウラニウム235及び不安定放射性元素の大量分離を禁止したが、原子核研究には特段の制限はしなかった。

コンプトン報告^[2.1, 2.2]は指令第3号と同じ内容で、「日本の原爆開発研究はその計算結果を見るに爆発目的ではなく原子力を石炭の代替とする計画と看做され、第3号による制限下で仁科、嵯峨根博士達の研究を許可しない理由はないし、我々は許可によって幾つかの利益を得ると信じる」とあり、非常に好意的報告だった。

モリソンは、「日本にはウラニウム資源がないから輸入を制限すればよいし、同位元素分離作業は査察可能である」、「仁科、嵯峨根、湯川、荒勝、菊池博士らの研究室には第一級の研究者が居て独創的業績をあげる能力を持っている」、「学生への教育は高水準で、研究者交流を行い共同研究をすれば、査察では得られない金銭以上の価値の効果があり、米国に対する理解を深め他の日本人へ良い影響を与えてくれると信じる」と書いている^[2.5]。ファーマンは、「戦時中の日本政府と軍は原子核研究に優先度を与えなかったから一流の研究者達は軍事研究に移っていたが、彼等は原子核理論の知識を十分に持っていて、条件が許せば原子力開発に能力を発揮するだろう」と、日本の原子核研究者の能力を高く評価した。また、「日本にはウラン資源が無いから、原子核研究者は原爆開発の意図を全く持っていなかった」と断定し、原子核関連の研究についてはウラン分離等の行為のみを禁止し、他の研究は自由に行ってよいと結論している^[2.4]。

2.2. GHQ/SCAPへ仁科博士のサイクロトロン稼働申請と許可

理研の仁科博士は、サイクロトロンの稼働許可を受けるべく昭和20(1945)年10月15日付で申請書をGHQ/SCAPに提出した^[4.1]。申請書には、60インチ-サイクロトロンにて発生する中性子及び生成放射化元素を用いて生物、医学、化学、金属分野の研究を行いたい、付属文書に示すように、生物分野では炭素にて植物の光合成機構、燐によるヌクレオチドの生物作用、中性子の植物遺伝子及び細胞への影響、ビタミンBの生化学作用、医学分野では癌への中性子の作用、燐による白内障の研究、食塩にて血液循環の診断、化学分野は硫黄、燐、シリコンにて化学反応研究、ナトリウム、燐、希元素にて微量化学分析、金属分野では拡散及び結晶構造の研究を行うと記載した。

この申請に対し、総司令部は10月17日付で東京中央渉外部より政府へ、「サイクロトロン使用を目的とする理研仁科博士の申請は、責任を持って指令第3号第8項の条項を遵守させることで許可する権限が政府に付与された」という覚書を送付した^[4.2]。数日後、総司令部は10月27日付で17日に与えた許可内容を訂正し、生物と医学の分野の研究は許可するが化学と冶金の研究は除外すると伝えてきた^[4.3]。

2.3. ワシントンから緊急電報によるサイクロトロン破壊と原子核研究禁止指令

突如、昭和20(1945)年10月31日に、ワシントンから大平洋陸軍総司令部(CINCPAC)のマッカーサー(MacArthur)に、日本の原子核研究を全面的に禁止する処置をとるべしという緊急指令電報 WX79907が届いた^[5]。発信者は統合

参謀本部 (Joint Chiefs of Staff) で、在ハワイ大平洋陸軍総司令部ニミッツ (Nimitz) とウェデマイヤー (Wedemeyer) にも伝えられた。その指令は、「これは原子力研究に対する米軍の政策である」、「原子力関連の全研究施設を軍が接收し研究者を管理下に置き、軍が取った行動を統合参謀本部に報告すること」、「原子力及び関連研究は全て禁止する」という内容だった。

マッカーサー総司令部では、唐突でしかも指令第3号に沿って許可した研究も禁止せよとの厳しい内容に疑問を持ち、問い合わせの電報を統合参謀本部と陸軍長官に送った^[6]。この疑問への返答が11月10日付の電報であり、「指令WX79907に従って総司令部がとるべき行動は原子力関連の研究を完全に禁止し、それらの研究の技術及び実験記録全てを押収し、理研、京大、阪大のサイクロトロンを破壊せよ」と指示してきた^[7.1]。之に従いGHQ渉外局は11月19日、日本政府に覚書を送り、理研のサイクロトロン稼動を許可した先の覚書は陸軍長官の指令により破棄し、稼動と研究を停止させよと命令した^[7.2]。

GHQ/SCAPへ上記指令を送付したのは統合参謀本部JCSになっているが実際は陸軍長官 (Secretary of War) で、指令送付の齟齬については既に小沼らによって詳しく論考されている^[1.1-1.6]。指令送付の経緯に関する米国側の資料として、グローヴス (Leslie R. Groves) は自らの著書にて詳細に記述し^[8.1]、同じくジョーンズ (Vincent C. Jones) も詳細に記述している^[8.2]。

§3. GHQ/SCAPがサイクロトロン接收破壊決定

GHQ/SCAPはJCSの指令に従って、担当部局の経済科学局 (Economic & Scientific Section) 主任レイモンド・C・クレーマー (Raymond C. Kramer) 大佐が、ジョセフ・A・オハーン (Joseph A. O'Hearn) 陸軍少佐に京都大阪へ出張を命じ、その出張には軍用機を含む可能な手段が許されているとオハーン少佐に伝えた^[9]。高級副官部補佐H・W・アレン (H. W. Allen) 大佐は、第6軍及び第8軍司令部に、マッカーサーの命令でオハーン少佐が総司令部代理として科学装置破壊を遂行するので、夫々の司令部はオハーン少佐の作業遂行に必要な対応をとるよう要請をした^[10]。

3.1. 京大サイクロトロンの接收

11月20日火曜日午前10時、第136歩兵連隊の兵士と共に、科学技術部のE・J・ドレイク (E. J. Drake) 中佐が京都大学の荒勝文策教授室へ来て、核物理学関連施設の所在を確認し研究記録を押収した。査察の報告には、「第一印象では荒勝教授は老令で友好的協力的であったが、後になって何かを隠そうとしていると感じた」と書いている^[11]。サイクロトロンの接收撤去運搬作業は後述のように、理研、阪大と共に事前通告無しに11月24日午前10時を期して行われた。

荒勝研のサイクロトロンは未完成で、コイルは取り付けられていなかった。それらは物理学教室建屋1階端の部屋に置かれていた。これらの形状は文末の写真5、6で示す。キャンパスの構造上、京大の全建屋は道路に面しているから、物理学教室建屋の周囲を兵士達は剣付き鉄砲を持ち昼夜厳しく警備した。

接收したサイクロトロンやその他の物を何処へ運んだかは不明である。

3.2. 阪大サイクロトロンへの接収

3.2.i. 米軍兵士との接触

11月20日火曜日の昼過ぎ、予告なく数名の米軍兵士が、筆者の所属している菊池研究室にきた。分隊長と思しき軍曹が「菊池研究室に鍵をかける」と言い、背の高い兵士がチョークでドアの上にKEEP OUTと書こうとしたので、我々はそれを見ていた。彼は文字が右上がりになり段々と小さくなるので、消しては書き消しては書きを繰り返したが一向にうまく書けず、まずい文字のままで止めた。後年の事だが、渉外局の軍属が言うには、1920年30年代の米国の農家では児童が重要な働き手だったので、小学校には4学年以降は登校させず働かせていたとのことである。多分、彼はそのような育ちだったのであろう。

新品と思われる軍服を着ている軍曹や兵士等には、戦勝国の軍人という偉ぶった態度や行為は全くなかった。軍曹が言うには、彼らは数ヶ月前に編成された新兵の部隊で、短期間の訓練後、海路和歌山に上陸し杉本町の兵舎に入ったとのことであった。何州の出身かと尋ねたら、マサチューセッツ州だと言うからMITの卒業生かと聞くと、彼は我々がMITを知っていることに驚き、とんでもない、スプリングフィールドの小さなカレッジを出た、と剽軽に身体をかがめて小さくなってみせた。

その夜のことである。我々は研究室に寝泊まりをしていたので夜中の事、誰かがドアを叩いた。兵士の一人が、電球が切れたから電球を欲しいと言うので、部屋の電球の一つ渡した。すると彼は、廊下の電燈を夜中点灯しておいてよいかとさくではなぬか。占領軍だから何も我々に許しを求めなくても思つた。軍隊では、日本でもそうだが、米国でも夜は消灯する決まりになっていると想像した。おそらく、彼はその規則で消灯したいが、警備している不案内な建物に不安を感じたのであろう。軍人であっても持っている、米国デモクラシーの真髄に接したという感慨を憶えた。

筆者らは、先の軍曹や他の兵士らと毎日雑談を交わしていた。彼らは星条旗紙も見せてくれた。我々の部屋は、同級の友人らも加わり彼らとの交流の場となつてた。彼らは戦争で勝つた国の軍人だという態度は見せず、敵国だったという感情を持つてるとは思えない親しい友人のような雰囲気であつた。

3.2.ii. オール中佐とチンマーマン軍属らの来訪

菊池教授室へ第98歩兵師団のオール (Aull) 中佐が、軍属G・B・チンマーマン (G. B. Zimmerman)、通訳ケン・ヤマダと大阪市立商科大学予科の岡本安章(英語担当)教授を伴つて来た。菊池先生との接見で先生が説明されたことを、チンマーマンがまとめて報告している^[12.1]。彼は翌21日も来て菊池先生の案内で研究室内の装置等を調査し、各装置に認定標識を付け、それらの所在場所を報告している^[12.2]。

軍属チンマーマンはシカゴのユニバーサル石油会社研究部の物理学者で、戦略空軍爆撃査察団の一員だった。彼の報告書には次のことが記されている。

サイクロトロンを米軍が接收海中投棄した経緯と阪大には2台と記録された根拠

- 菊池先生が話された物理学教室の状況。
- 菊池先生の研究経歴。
- 菊池先生は1943年8月まで大阪で研究活動をしていたが、レーダー開発の為東京目黒の第二海軍技術廠の研究所へ移り、我々の訪問1ヶ月前に大阪へ戻っていた。
- 阪大の初めのサイクロトロンは1938年に建設された小さなモデルで、サイクロトロンとして使われたことはなく、1945年春、甲南高校(専門学校)に移されていたが、我々が訪れた時には戻されていた。この装置はベータ線分析に使用されていた。
- 二つ目の大きなサイクロトロンは1939年に完成し1942年春まで研究に使われていた。現在は改良のため解体されている。これは米国の標準から見れば小さいが、デューテロンを5 MeV まで加速する能力がある。
- 大学には放射性元素貯蔵はなく、放射性元素分離は行っていない。
- ノルウェーから輸入した少量の重水を持っている。
- 研究室にはサイクロトロンの他、1 MeV ヴァンデグラーフ、600 KVolt コッククロフト、中性子の磁界中での偏向測定用磁石(ラビの実験)とベータ線分析装置がある。これらはここ数年間使用されていない状態である。

さらにチンマーマンは、サイクロトロン建設の経緯、教室の研究費等にも触れ、海外からの出版物による研究情報は1941年8月が最後だったと書き、菊池教授から1934-1943年の間に公表された研究論文別刷全てを提供されたこと、各研究室はエリス(Ellis)中尉引率の兵士により閉鎖され監視されたと記述している。

以上がチンマーマンの報告だが、後で述べるように彼の記述には幾つか実際と異なるところがある。多分、通訳や岡本教授が物理学用語を正確に翻訳できなかったのか、菊池先生の英語およびチンマーマンらの米語のため、意志疎通を欠いたことに原因があると思われる。

§4. 通信社へサイクロトロン破壊事前通知と新聞記事

GHQ渉外部は1945年11月23日午後7時30分、通信社へ事前通知をした^[13]。1945年11月24日正午に発表するが、それまでは、これから示す内容の如何なる事項も公開及び論評を禁じるという条件で以下のこと示した。

「合衆国軍が日本の原子研究装置を破壊する」という表題で、その内容は凡そ以下の通りであった。

- マッカーサー元帥の命令により、第6及び第8米国占領軍は三都市にある5台のサイクロトロンと関連装置を含む日本の原子エネルギー研究装置の完全な破壊が本日午前10時に開始された、これは日本の戦争潜在能力を破壊する連合国の政策による行動である。
- GHQ経済科学局工業部部長、ジョセフ・A・オハーン少佐がマッカーサー元帥代理として装置の接收と破壊の作業を行う。日没までに日本の原子研究

を大幅に減じることとなる。

- 大阪帝大の小さなものから仁科研究室の米国製200トンのものまであり、2台が阪大、1台が京大、2台が理研にある。
- 帝国政府と装置を所有している科学者には、本日午前8時半までこの接收破壊行動を知らせない。
- 大阪と京都の装置は解体して持ち出し爆砕し海に沈める。理研のものはいくつかに切断し海に沈める。

以下、理研を査察したオハーン少佐の記録を基に仁科博士の研究経歴とサイクロトロン建設の経緯、京大を査察したドレイク中佐の報告^[11]を基に荒勝教授の研究経歴とサイクロトロンの現状、阪大については軍属チンマーマンの報告^[12.1]に基づいて菊池教授の研究経歴とサイクロトロン建設と現状、物理学教室の状況等が詳細に記述されている。

新聞各紙は、サイクロトロン接收破壊について次のような見出しで報じた。

- 朝日新聞東京本社の記事^[14.1]：タイトルは「放射線症も治る傳研の原子爆弾調査」サブタイトル「わが原子施設破壊」。
- 朝日新聞大阪本社の記事^[14.2]：タイトルは「日本の原子研究終焉 仁科研究室などの施設破壊」。
- 毎日新聞東京本社の記事^[14.3]：一般記事と同じ扱い。
- 読売報知新聞^[14.4]：タイトルは「原子核研究を根絶」。

いずれも先の事前通知の抄訳である。読売報知新聞の記述が正確で詳しく、朝日、毎日新聞では、日付が事前通知のあった23日になっている。

§5. サイクロトロン破壊に対する仁科博士の弁明書

仁科博士は、1945年12月20日の日付で、GHQ渉外局宛てにサイクロトロン破壊への抗議弁明書を書いた。その英文タイプのコピーが柏書房刊の『GHQ/SCAP トップ・シークレット文書集成』に収録されている^[15.1]。第1頁上部に手書きで「この弁明書は渉外局宛に書いたがその影響するところを考慮すると不要な疑義を招くようだから提出しなかった」という主旨のことが書いてある。文字の特徴から仁科浩二郎氏は父の筆跡だと断定された。

弁明書には以下のことが記されている。

- 1945年10月15日、GHQ/SCAPにサイクロトロン稼働を申請し許可された。
- 11月22日夕刻、中央渉外部から覚書が来て先の許可を取消し研究を停止すると命令された。
- 11月24日午前8時半、GHQのオハーン少佐がサイクロトロン破壊を伝え、第8軍の工兵が昼夜作業し5日かかって破壊した。
- 11月24日午後、仁科は理研事務局長井口を伴って中央渉外部へ赴き、破壊の現状を伝えその根拠を糺した。しかし、破壊は米国政府の指令であると

サイクロトロンを米軍が接收海中投棄した経緯と阪大には2台と記録された根拠

いう以上の由は伝えられなかった。

- このとき、仁科が米国科学者の意見を聴取したかと糺したのに対し、オハーン少佐は「勿論そうだ、日本に来たコンプトン博士の意見が政府の行動に反映されている」と付け加えた。しかし後日、これは間違いだと判った。
- 今日に至っても破壊の理由は全く理解できない。素人集団の単純な「未知への恐怖」によるものだろう。確かにサイクロトロンは原爆製造初期の段階では使われたが、今では原爆製造方法が確立しサイクロトロンは不要となった。
- 日本にはウラニウム資源がないことが明白にされた。
- 先にサイクロトロン稼動許可を申請したのは、戦前同様戦後の生物及び医学の研究にて国民の生命と健康増進をはかる目的である。GHQ科学情報調査団団長コンプトン博士は、GHQに対しサイクロトロン運転は許可してよいと報告している。十分な考慮もされずに破壊されたのは我々の想像を越えるものである。
- 多くの科学者が10年を越える努力と少なくない費用で建設したサイクロトロンの破壊により研究の機会を一瞬にして取り上げられた。
- 「星条旗紙」及び「タイムズ紙」によれば、原爆製造に参加した科学者達は、サイクロトロン破壊を「人類への犯罪で謂なき愚かな焚書のような見苦しい邪悪な行為だ」と言っている。そして「研究装置の有用性と16インチ砲の軍用重要性との区別ができない人物は、決定権を持つ地位に就くべきではない」と付言している。
- ハーバードとMITの科学者は、日本のサイクロトロン破壊を命令した陸軍長官パターソンを告発する手紙を送った。MIT学長コンプトンは指令を送信した役人を即刻解任するよう強い言葉で促す手紙をパターソンに送っている。
- サイクロトロン破壊がアメリカの科学者間で議論され、オハーンがその人達の意見を聞いたと我々に言ったのは本当ではなかったことが明らかになった。
- 米国政府とGHQとの往復通信で、陸軍省がサイクロトロンの破壊を指令したことが明らかになった。
- ニッポンタイムスは、日本のサイクロトロン破壊は省内の過ちの一つ、とパターソンが述べたとサンフランシスコ放送が報じたことを記事にしている。もし、それが事実なら、1. サイクロトロンの完全な復旧、2. 生物、医学の研究の為、先に述べた放射性元素を米国より輸入する措置を要求する。この要求を中央渉外局から米国政府へ伝えて欲しい。

以上が弁明書の中身で、その末尾の追伸では、パターソン陸軍長官が来日し、1946年1月10日の記者会見でサイクロトロン破壊の責任は自分にあり送付した電文は見えていないし、科学顧問官に意見を聞かなかったと述べているとある。この追伸は記者会見後に書かれたと思われるが、弁明書日付の12月20日は訂正されていない。

この弁明書は、来日した米国原爆被害調査委員会の一員ポール・S・ヘンショウ (Paul S. Henshaw) がそのコピーを入手し1947年に「日本の科学者サイクロトロン破壊を語る—仁科芳雄」という題で、『原子科学者会報 (Bulletin of the Atomic Scientists)』に掲載された^[15,2]。

§6. チンマーマンは何故阪大に2台と記録したか

6.1. 話し言葉の問題

敗戦直後に米国軍人と接触して、我々が彼等の米語発音を、また彼等が日本人の英語発音を聞くのは、双方とも全く耳新しく、会話では互いに話の内容を十分に理解していたとは思えない。戦前に於ける菊池先生らの研究主流はドイツ物理学指向で、使用言語は医学同様ドイツ語だった。

菊池先生と面談した翌日の11月21日に再来訪したチンマーマンを、菊池先生が各研究室に案内され2階へ来られた時、伊藤順吉先生や渡瀬譲先生も一緒に、それに筆者も加わった。ラビの装置の部屋にオシロスコープが置いてあった。菊池先生が日本製陰極線オシロスコープと言われたが、陰極線 (cathode-ray) は通じたがオシロスコープ (oscilloscope) が通じなかった。彼はその装置が何か判ったので発音してくれたが、我々には全く違った言葉セレスコープのように聞こえた。次に菊池先生がアルヴァレ (Alvarez) のキャヴィティ・マグネトロン (cavity magnetron) の話をされると、先ずアルヴァレが彼には全く通じない。菊池先生がチョークで床にスペルを書かれて彼は理解し発音してくれたが、アルヴァレとは聞こえなかった。菊池先生が彼に続いて発音されたが、彼は違うと言う。結局、彼流の発音は誰一人できなかつた。また我々には、彼のキャヴィティと言う発音はキャヴァレと聞こえた。当時繁華街で流行し始めた cabaret のような発音なので、一同大笑いした。このように、米語の発音は我々の日本語的英語発音とは全く違う。tの発音は殆ど聞こえない程ソフトだし、vとfは確実に唇を使わねばbとsになってしまうなど、彼は教えてくれた。

チンマーマンの態度といい、研究室閉鎖にきた兵隊の態度といい、彼等は戦勝国軍人が敗戦国の人間に対し優越的行動は一切せず、友好的であった。菊池先生を世界一流の学者だと尊敬し、我々に対しても大学人で兵隊より高い教育を受けた者だと認識しているようだった。この親しい友人のような態度から、菊池先生は学生に教えるようにチンマーマンに種々の装置について丁寧に説明され、次項で述べるようなジョークもでてきたのではないかと思われる。

SCAPの通訳は、戦前に渡米した移民の日系二世と思われる。彼等の日本語は親達の出身地方言、アクセントなどが受け継がれていた。戦前の日本では物理学用語が語学専門の人達に理解されたかどうか疑問に思われる。広島原爆被害についての著述目的で1976(昭和51)年来日し、多くの日本人に面接取材をして1980(昭和55)年に発刊した『エノラ・ゲイ』の著者は、「日本語をそのまま英語に訳すことはほとんど不可能であるということをよく認識していた……幸い有能な通訳の助力をうることができた……」と書いている^[16]。戦後30年を経過している時のことである。

著作の場合は時間をかけて適訳を選べるが、会話では話が流れて行くし、先

に書いたように菊池先生の英語はおそらくドイツ語的発音で、チンマーマンには判り難かったと思う。だから彼の印象に残った言葉や装置の名前を彼自身知っている知識で解釈し辻褄を合わせて報告書に記述したと思われる。

6.2. 菊池先生のジョーク

菊池先生はチンマーマンをベータ線分析電磁石の部屋へ案内され、実験の目的を説明されると共に電磁石の形を話される時、真空槽全体がビーズワックスで覆われていて磁極の辺りの型がよく判らないので、「ローレンスがサイクロトロンを開発する時に作った電磁石そっくりな型で例えるとペイビー・サイクロトロン」と言われた。チンマーマンはベータ線分析目的の電磁石と記し、同時に小サイクロトロンと記録した。

このジョークについて『菊池正士業績と追想』の中で伏見康治先生が書いておられる^[17]。

昭和20年8月の敗戦の後、菊池は大阪に帰った。……懸命に守ろうとした祖国が惨めな敗戦を喫し、しかもそれが原子爆弾によって最後のとどめをさされたということは、原子核物理学者として特に堪えがたいことであつたらう。その悲劇がクライマックスに達したのは米軍兵士によって阪大のサイクロトロンが爆破して持ち去られるのを手をこまねて傍観しなければならなかったことであつた。ベータ線のエネルギー分析に使った小さな電磁石を冗談に小サイクロトロンと説明したら、それまで誤って持ち去ってしまったと苦笑しながら後に語ったのは、その悲劇の中の僅かな笑いであつた。

6.3. 小サイクロトロンとなったベータ線スペクトロメーター電磁石

菊池研究室では、サイクロトロンの陽子線照射で放射化した崩壊原子核からのベータ線及びガンマ線スペクトル測定を研究テーマの一つとしていた。伊藤順吉先生の記述によれば、菊池先生は低エネルギー電子の運動量を磁界中の円運動から求める場合、ウイルソン霧箱中や空気中では多重散乱のため誤差が大きくなるから真空中で行うべしと主張しておられた^[18]。1937(昭和12)年、伊藤先生は菊池先生の指示により、定常磁界(電磁石)中に置いた真空箱内で運動量を測定するベータ線スペクトロメーターを製作し、ラドンがニッケルまたは白金上に沈着してできたRa-Eからのベータ線運動量を測定した^[19]。丁度サイクロトロンが完成したので、陽子ビームで放射化した窒素のベータ線運動量をこの装置で測定し、サイクロトロンによる原子核実験の初論文として報告された^[20]。伊藤先生が作られた装置については、実験結果と共に報告された^[21]。この装置は、英国ケンブリッジの研究者が製作した装置と似ていた^[22]。この電磁石は理学部建屋の中央翼2階の部屋に置かれており、大きさは高さ約50cm、幅30cm(磁極直径30cm)、長さ約50cmで、真空槽は磁極間に挿入されていて、真空洩れを防ぐため全体が磁極と共に一体となりビーズワックスロジンで覆われていた。この装置を使用した実験は、サイクロトロン運転中断と共に休止となった。その後、この電磁石は研究室に置かれ、持ち出されたことはなかった。

2008年に時事通信社米国ワシントン支局の不動尚史氏が、米国立公文書館にてサイクロトロン接收時に米軍が撮影した写真を発見した。その中に、チンマーマンがこの電磁石を調べている写真があった(写真4)。

6.4. 高等学校へ移された電磁石

奥田毅先生が、阪大理学部物理学教室の一部に理研二号研究阪大分室^[23]を設置した。ウラン235の分離度検定のため、アルフレッド・O・ニアー (Alfred O. Nier) が開発したイオン電流を測定する方式の質量譜測定計マス・スペクトロメーター^[24]の製作を計画した。磁界は断面が10cm×10cmの軟鉄角材5個で、磁極間5cmになるように角張ったC型電磁石3個で形成する方式とした。軟鉄角材は日立製作所で作られ、工作は神戸製鋼所の下請けが行った。元物理図書室が菊池研究室となった部屋に、奥田先生設計の配置図に従って電磁石を置くコンクリート台が設置された。昭和19(1944)年12月末に筆者と杉本健三が理研から運んだ綿巻き銅線を、翌年正月に筆者、杉本、菅浩一でコイルに仕立てた^[23]。

昭和20(1945)年3月12日夜半からの空襲で、大阪市の大半が焼失した。理学部建屋は焼けなかったが、空襲が激しくなったので、5月中旬に芦屋岡本の甲南高等学校へ、この電磁石と、渡瀬先生がラビの実験用に設置されていたコイルへの電源として使う予定の大きな鉛蓄電池及び充電用水銀整流器を疎開した^[23]。甲南高校へは、浅田常三郎研究室の一部も疎開していた^[23, 25]。

これらの装置は、敗戦後9月までに全て中ノ島に戻された。菊池先生がチンマーマンを研究室へ案内された時、この電磁石を置いてある部屋には入れなかったもので、チンマーマンは原物の電磁石を見ていない。

§7. チンマーマンの記録と実際との照合

チンマーマンの記録^[12.1]と実際の状況を照合すると、次のようにまとめられる。

チンマーマンの記録	実際の状況
初めのサイクロトロンは1938年に建設。	彼が「初めのサイクロトロン」としたのはベータ線スペクトロメーター電磁石のこと。製作は1938年で、また28インチ-サイクロトロン建設完了の年でもある。
小さなモデルで、サイクロトロンとして稼動。	ベータ線スペクトロメーター電磁石だからサイクロトロンでもモデルでもない。しかし、ローレンスがサイクロトロン開発初期に作った電磁石と類似の形状だったからローレンスの開発作業を彼が記憶していてモデルに仕立てたのかも知れない。
1945年春このモデルは甲南高校に移された。	「1945年春」に甲南高校に移されたのは二号研究で奥田先生設計製作のマス・スペクトロメーター電磁石 ^[22] である。彼が「モデル」と書いているのはベータ線スペクトロメーター電磁石のことだが、電磁石という言葉が同じだから彼はマス・スペクトロメーター電磁石とを完全に混同している。

サイクロトロンを米軍が接收海中投棄した経緯と阪大には2台と記録された根拠

甲南高校をTechnical College専門学校と記述している。	甲南高校は私立普通科高校で国公立高校と同格。専門学校としたのは物理の装置を受入れたから関係がある専門学校と判断したのか、或いは菊池先生が説明された私学という言葉が彼流に解釈したのかも知れない。
我々が訪れた時、この装置は戻されていた。しかし組立は未完だった。	マス・スペクトロメーター電磁石は9月に戻されていた。当然マス・スペクトロメーターとしては未完でその後、筆者と杉本が数カ月かけてマス・スペクトロメーターとして完成した ^[22] 。彼は前項で述べたようにこの電磁石は見えていないから、記述は菊池先生の説明をそのまま書いたと思われる。

§8. 結論

菊池先生が言われたベィビー・サイクロトロン (小サイクロトロン) という言葉から、チンマーマンはベータ線スペクトロメーター電磁石の機能と目的を正確に認識しながらこれをサイクロトロンと記録し、その大きさからローレンスがサイクロトロンを開発する際に製作した電磁石を思い出して記述したと思われる。サイクロトロンとして稼動したことの無いモデルとして高等学校へ持って行っていたと書いているのは、二号研究のマス・スペクトロメーター電磁石とを混同したと思われる。斯くしてベータ線スペクトロメーター電磁石が「高等学校へ持ち出されていたモデルの自家製サイクロトロン」となって、「阪大の2台目のサイクロトロン」として米国の公式記録に記載されることとなったと思われる。

§9. サイクロトロン接收時にその作業等を米軍が撮影した写真

2008 (平成20) 年9月、米国ワシントンDC在の時事通信社ワシントン支局の不動尚史氏が、米国立公文書館にてサイクロトロン接收時に米軍が撮影したスチール写真を探し出し、その数葉のコピーが筆者に提供された。

当時の国内の新聞では、読売報知新聞が、理研サイクロトロンの一部 (真空槽を兼ねた高周波導波管と思われる) が東京湾上で船より海へ投棄される写真を1葉掲載した。最近になって種々の米軍機密文書等が公開され、その中で、接收に関連する場面を米軍が16ミリ映画に撮影し編集したフィルムも公開された。しかし、サイクロトロン解体作業自体は写されていない。また、撮影場所や時間等の説明がなく、その編集も場面が入り混じっている。従って、不動氏から提供された写真は、彼等の作業状況を知る貴重な資料である。本稿末尾に、今回の報告に係る数枚を示した。それぞれの写真には撮影時の記録メモが付加されているが、軍人によって書かれた記録であり、正確ではない。例えば、阪大のサイクロトロンの写真に付けられたメモにはベータ線スペクトロスコープ電磁石と本物のサイクロトロン電磁石とが混同されているし、京大の電磁石を日本最大のサイクロトロン電磁石と記述している。

不動氏から送付された写真には仁科先生のサイクロトロンを海中投棄している写真が数種あるが、本体の電磁石が投棄されている写真は含まれていないし、

阪大と京大の場合の海中投棄の写真はない。

本稿に掲載した写真には米国立公文書館所蔵(時事)と明示してある。これは写真を利用するときにはその出所を明確にするため、不動氏の指示により筆者がこのように挿入した。

§10. 理研60インチ-サイクロトロン設計青図について

理研の60インチ-サイクロトロンを建設するにあたり、仁科博士は矢崎為一、渡辺扶生、飯盛武夫をローレンスの元に派遣し設計青図を貰うことや真空ポンプ等の購入を計った。この間の事情については辻哲夫と田島英三が記述している^[26, 27]。これらの記述では設計青図はローレンスから貰ったことになっている。最近になって中根良平先生(元理研副理事長)が、仁科記念財団の部屋になっている仁科先生の部屋に青図は渡せないという主旨の断り状があるのを見つけ歴史秘話として公表された^[28]。次のように書いておられる。

「入手できなかった設計図」

ローレンスは弟子D. クックセイに設計図のコピーを矢崎為一に渡すよう指示していた筈だが、なかなか来なかった。1940年11月矢崎は帰国の日となり米国滞在中の高嶺俊夫にそれを貰うよう依頼して帰国の途についた。やがて高嶺にクックセイから「設計図青焼きは作れない」との断り状が届き、それが仁科先生へ送られた。仁科先生は誰にもこの事を言わなかったようである。この断り状を最近仁科先生の部屋(記念財団となっている)で中根たちが見つけた。

中根によれば、仁科先生がニューヨークへ行かれた時、ドイツハンブルグ留学時の共同研究者だったI. I. ラビがコロンビア大学に居り、丁度サイクロトロンが解体修理中だったので彼が内部を詳しく見せた。その時の記憶と知識で、1942(昭和17)年に仁科先生自らが設計図を描いたらしい。

謝辞

原稿を読んでもらった友人、特に杉本健三氏からの貴重な御意見に感謝します。サイクロトロン接收時の写真を筆者に送付され、その使用を許された時事通信社ワシントン支局の不動尚史氏の御好意に感謝します。

註

[1.1] 今村昌「科学史の一断面—理化学研究所サイクロトロンの破壊とアメリカ科学者の反撃」『経営情報科学』3巻3号(1991年), 171-180頁.

[1.2] 小沼通二, 高田容士夫「理研サイクロトロンの破壊(1945)について」『日本物理学会誌』46巻6号(1991年6月), 496-7頁.

[1.3] 小沼通二, 高田容士夫「日本の原子核研究についての第二次世界大戦後の占領軍政策」『科学史研究 II』31巻(1992年), 138-145頁.

[1.4] 小沼通二, 高田容士夫「第二次世界大戦後の日本の原子核研究と極東委員会」『科学史研究 II』32巻(1993年), 193-201頁.

[1.5] 山崎正勝「GHQ史料から見たサイクロトロン破壊」『科学史研究 II』34巻(1995年), 24-26頁.

[1.6] 中山茂「1-3. サイクロトロンの破壊」, 第1部 GHQ と非軍事化政策『通史・日本の科学技術』1巻, 編集代表: 中山茂, 編集: 後藤邦夫, 吉岡斉, 学陽書房, 東京(1995年6月20日), 77-84頁.

[2.1] 市川浩, 平成8年度—平成10年度科学研究費補助金(基盤研究C)研究成果報告書「第二次世界大戦期における日本の戦時科学技術研究の実態に関する実証的研究」(平成11年3月)(課題番号: 08680075).

市川が調査した原爆調査団に関するマイクロフィルム記録とアルソス報告夫々の幾つかは, 柏書房刊の『GHQ/SCAP トップ・シークレット文書集成』に収められている.

『GHQ/SCAP トップ・シークレット文書集成』柏書房刊.

第I期『AG(高級副官部)文書(Adjutant General Section)』全20巻と別巻(INDEX), 監修: 天川晃, 編集, 解説: 荒敬, (1993年12月20日). INDEX は(1995年10月20日).

第II期『行政・法律関係文書』.

第III期『経済関係文書』全12巻と別巻(INDEXと解説). 編集: 浅井良夫, (1997年10月31日).

第IV期『原爆と日本の科学技術関係文書』全11巻と別巻(INDEX), 編集: 安斎育郎, (1998年2月20日).

これらの記録の引用は, 例えば第I期の2巻, 125頁の場合, 『柏-I-2-125』と記す.

仁科博士とGHQ間の書簡集(三巻)に理研仁科博士に関するGHQの指令や書簡(邦訳)が収録され, それぞれに番号が付けられているので, 引用は『書簡集 巻一頁一番号』, 例えば『書簡集 III-1001-2212』と記す. 書簡類の番号は第I巻から通しの番号が付けられている.

『仁科芳雄往復書簡集—現代物理学の開拓』III「大サイクロトロン・二号研究・戦後の再出発1940—1951」中根良平・仁科雄一郎・仁科浩二郎・矢崎裕二・江沢洋 編, 協力: 財団法人仁科記念財団, みすず書房, 東京(2007年2月28日).

[2.2] 笹本征男「科学情報調査-コンプトン調査 The Scientific Intelligence Survey: The Compton Survey」, 中山茂, 後藤邦夫, 吉岡斉: 責任編集『通史・日本の科学技術1: [占領期]1945-1952』学陽書房(1995年), 46-55頁.

[2.3] 20 Sept. 1945. K. T. Compton報告原文のマイクロフィルムコピーは『柏-IV-4-273-274』, 『書簡集 III-1166-1174』.

[2.4] 30 Sept. 1945. ファーマン報告『柏-IV-3-147-150, -4-269-272』.

[2.5] 20 Sept. 1945. モリソン報告『市川報告[1.1]』付表.7のNo. S-18.

[3] GHQ/SCAP Directive No.3 指令第3号, これは『GHQ/SCAP トップ・シークレット文書集成』には含まれていない. 原文は他の指令と共に原文マイクロフィルムのコピー集, 竹前栄治監修『GHQ指令総集成』全15巻, エムティ出版, 東京, (1994年)の第2巻SCAPIN 1- 400, 79-81頁に収録されている.

この指令は9月22日に政府へ伝達されていて, 1項の総括でこの指令及び記述されているSACPの要請に応ずる事を政府は遵守すべしと指令し, 日本の戦争軍備に関連する物資, 生産, 保有行為に対する禁止措置を2以下7項にて詳細に指令し, 8項で研究活動への制限条項を述べている.

GHQ/SCAPは, 我が国を統治する政策, 指令, 許認可等は日本政府に指示して, 政府の名の基にそれらを実施, 実行する間接統治方法をとった.

[4.1] 15 Oct. 1945. 仁科の請願『柏-IV-6-125-127』, 『書簡集 III-1171-1179』.

[4.2] 17 Oct. 1945. 10月15日付仁科の請願に対する許可覚書『柏-IV-6-122-123』, 『書簡集 III-1175-1182』.

[4.3] 27 Oct. 1945. 10月17日付許可覚書の内容変更通知覚書『柏-IV-6-117-118』, 『書簡集 III-1178-1187』.

[5] 31 Oct. 1945. ワシントンJCS(統合参謀本部)から緊急指令電報WX79907『柏-I-1-292, -IV-1-41, -4-194, -4-280』項目分類整理上コピーが4枚存在する, 『書簡集 III-1179-1188』.

[6] 6 Nov. 1945. 緊急指令電報 WX79907の内容に対するGHQ/SCAPの疑問を統合参謀本部へ送った電文『柏-IV-1-38-40』, Morelandの手書きの電文原稿『柏-IV-1-114-115』.

[7.1] 10 Nov. 1945. JCS から WX79907 に沿う行動の具体的指示『柏-IV-1-36, 37, -IV-6-80』.

[7.2] 19 Nov. 1945. 理研に与えた許可の取り消しと研究禁止の命令を日本政府へ伝えた覚書『柏-IV-6-109-110』, 『書簡集 III-1182-1193』.

[8.1] GROVES, Leslie R., *Now It Can Be Told: The History of The Manhattan Project* (Da Capo Press, 1983) New York . Originally published: Harper (1962), p. 367. CHAPTER 27, "The Destruction of the Japanese Cyclotrons."

[8.2] JONES, Vincent C., *Manhattan, the Army and the Atomic Bomb* (United States Army in World War II, (Special Studies/Center of Military History, Unites States Army) 1985) Center of Military History, Unites States Army, Washington, D.C., p. 585. "Destruction of Japanese Cyclotrons."

[9] 13 Nov. 1945. オハーン少佐派遣命令『柏-IV-6-111-112』.

[10] 12 Nov. 1945. 第6, 第8軍へ破壊作業要請『柏-IV-1-33-34, IV-6-79』.

[11] 日付無し, 多分, 20 Nov. 1945. ドレイク中佐による京大荒勝研査察報告『柏-IV-1-31』.

[12.1] 20 Nov. 1945. チンマーマンによる阪大査察報告『柏-IV-1-27-29』.

[12.2] 21 Nov. 1945. チンマーマンによる装置リスト報告『柏-IV-1-23-26』.

[13] 23 Nov. 1945. サイクロトロン破壊を通信社へ事前通知(故清水榮京大名誉教授より入手)。『書簡集 III-1185-1196』。

[14.1] 朝日新聞東京本社, 昭和20年11月25日, 日曜日, 第2面(この頃の新聞はタブロイド版で朝刊は1枚)。

[14.2] 朝日新聞大阪本社, 昭和20年11月25日, 日曜日, 第2面。

[14.3] 毎日新聞東京本社, 昭和20年11月25日, 日曜日, 第1面。

[14.4] 読売報知新聞社, 昭和20年11月25日, 日曜日, 第2面。

[15.1] 20 Dec. 1945. 仁科博士のサイクロトロン破壊に対する弁明書『柏-IV-6-93-98』。最終頁の要望と追伸が書簡集に収録され、『書簡集 III-1198-1209』で「声明」となっている。弁明書の記述と殆ど同じ文面で、仁科博士は12月26日付で横田喜三郎宛に「仁科研究室サイクロトロン破壊の顛末」として書かれている。『書簡集 III-1209-1212』。

[15.2] Yoshio Nishina, “A Japanese Scientist Describes the Destruction of His Cyclotrons,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 3(1947): 145, 167.

[16] ゴードン・トマス, マックス・モーガン・ウィッツ(松田銑 訳)『エノラ・ゲイードキュメント・原爆投下』TBSブリタニカ, (1980年7月15日)。

[17] 伏見康治「菊池正士先生略歴」『菊池正士—業績と追悼』(1978年11月12日), 菊池記念事業会編集委員会, 非売品, 103頁「第2部 あゆみ」。

[18] 伊藤順吉「大阪大学の昔のサイクロトロン」『日本物理学会誌』32巻, 9号(1977年), 706-713頁。

[19] WATASE, Yuzuru and Junkichi ITOH, “The β -ray Spectrum of Ra-E,” *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan* 20(1938): 809-813.

[20] KIKUCHI, Seishi, Yuzuru WATASE, Junkichi ITOH, Eiichi TAKEDA, and Seitaro YAMAGUCHI, “The β -Ray Spectrum of ^{13}N ,” *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan* 21(1939) Short Note: 41-42.

[21] ITOH Junkichi and WATASE Yuzuru, “ β -rays Emitted from Rn and MsTh-I and Their Daughter Elements,” *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan* 23(1941): 142-159.

[22] NEARY, G. J., “The β -ray Spectrum of Radium E,” *Proc. Roy. Soc. London* A174(1940): 71-87.

[23] 福井崇時「理研ニ号研究阪大分室について」『技術文化論叢』7号(2004年), 40-53頁。

[24] Nier, Alfred O, “A Mass-Spectrographic Study of the Isotopes of Argon, Potassium, Rubidium, Zinc and Cadmium,” *Phys. Rev.* 50(1936): 1041-1045.

[25] 広島県史・原爆資料編(昭和47年3月31日), 広島県編集発行, 579頁。

浅田先生の項に先生の日記が掲載され, 「研究室の機器図書三重県名松線沿線の竹原村の公民館へ自動車(トラック)二台分疎開のこと」とある。

[26] 辻哲夫「仁科芳雄の生涯・1890～1951」『日本物理学会誌』45巻10号(1990年), 「特集・仁科芳雄生誕百年記念」712-719頁。

[27] 田島英三「理研のサイクロトロン物語」『日本物理学会誌』45巻10号(1990年), 「特集・仁科芳雄生誕百年記念」, 734-737頁。

[28] 中根良平(元理研副理事長)「特集・歴史秘話—サイクロトロンと原爆研究(後編)」「入手できなかった設計図」『理研ニュース』No. 298(April, 2006年), 8頁。



写真1

接收の前、昭和20(1945)年11月19日に東京の理研サイクロロン制御室で、Spaght博士(軍属)が押収した資料について仁科博士に質問しているところ。中央はタケヒコ・ヨシハシ通訳。この時には接收することを仁科博士に伝えていない。



写真2

阪大サイクロロン建屋の壁をブルドーザーで壊し、接收作業を検討しているところ。大阪大学理学部の中央棟の西階段から撮影したと思われる。学部敷地を囲っていた塀は全て壊されていて、学部西隣の廃屋が写っている。ブルドーザーにて簡単な一瞬の破壊作業だった。作業を見物している理学部の研究者たちの姿が写っている。接收作業は、昭和20年11月24日の午前8時頃から始まり夕刻日没時までかかった。

サイクロトロンを米軍が接收海中投棄した経緯と阪大には2台と記録された根拠

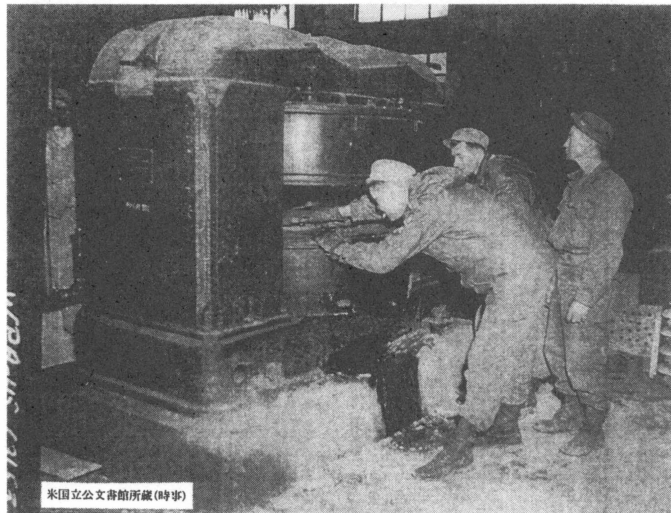


写真3

阪大サイクロトロン電磁石の解体を工兵隊員が始めたところ。電磁石を基礎コンクリートに固定したボルトは爆薬でコンクリートを破壊して、電磁石をブルドーザーで引きずり出した。(写真2と同日)



写真4

2台目の小サイクロトロンと記録された阪大のベータ線スペクトロメーター電磁石を調べているところ。軍属 Zimmerman がノギスでコイルの巻線寸法を測っているのを見ているのは Aull 中佐。スペクトロメーター本体の真空槽は取り除かれてある。(写真2と同日)

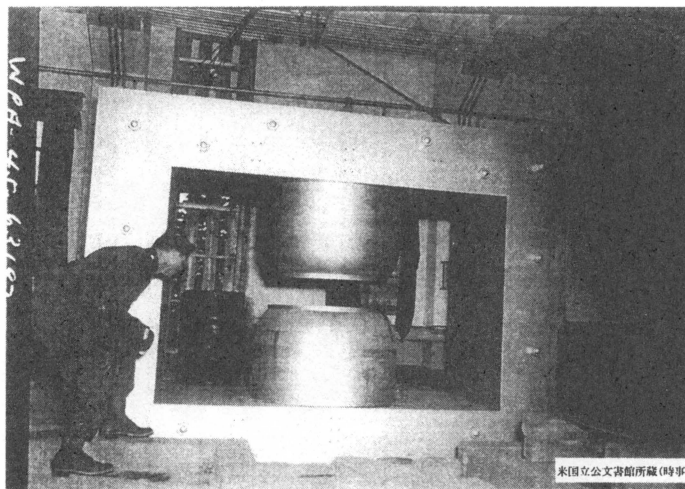


写真5

京大サイクロtron電磁石を調べている Dawig 大尉。コイルは取り付けおらず床上に置かれている。記録メモには最も大きいサイクロtronとある。京大に来た軍人は理研の大サイクロtronを見ていないと思われる。(昭和20年11月24日、京都大学)

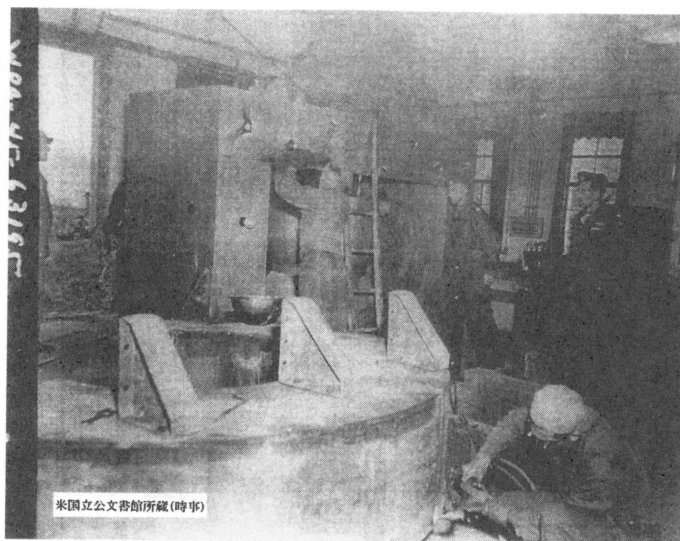


写真6

京大サイクロtronの解体作業。この写真にはコイル容器が写っている。(写真5と同日)

US Army Destroyed Japanese Cyclotrons: US Official Record Shows Two in the Imperial University of Osaka, What was the Second.

FUKUI, Shuji*

The US army occupation troops seized Japanese cyclotrons and threw them into the sea under the orders from General MacArthur. They announced that these actions were another step in the Allied Policy of destroying Japan's war-making potential. However, it was clarified that this order to GHQ/SCAP in Tokyo was sent out by mistake from the War Department in Washington. In the US official documents the numbers of cyclotrons destroyed were recorded, that is, two in the Imperial University of Osaka, one in the Imperial University of Kyoto, and two in Nishina Laboratory of RIKEN. In this report it makes clear that by what process this second one in Osaka University was listed as a cyclotron to be destroyed.

The army took photos of the scenes that soldiers were working on scrapping cyclotrons and preserved them in the US National Archives. Some of them were shown in this report.

The official reports on construction of the Nishina's large cyclotron show that a copy of the blueprint of plan of construction was given by Prof. Lawrence. Recently Dr.Nakane found in a Nishina's desk the letter of regret telling such copy could not be given. The brief story written by Dr.Nakane is described here.

* Professor Emeritus of Physics, Nagoya University

2008 年度 博士・修士論文梗概

2008 年度提出博士論文

日本における電力系統技術の発展に関する研究

荒川文生

19 世紀末ドイツの熱輻射実験の展開

—「目的」「機器」「機器構成」を介しての実験プログラムの相互交流—

小長谷大介

2008 年度提出修士論文

清末中国の近代的科学技術導入における

清官僚の明治日本視察の役割

盛葉蘭

日本における電力系統技術の発展に関する研究

木本研究室 荒川文生¹

1. 概 要

本研究は地球環境や電力自由化といった問題の中で電力系統技術のあるべき発展方向を見極めることを目的としている。その為、日本における電力系統技術発展の通史的分析によるその基本構造の解明と技術発展の分析手法の開発を課題とする。

まず、本研究は、明治期から現在までの時代における社会的背景のなかで電力系統技術を通史的に分析した。即ち、1880年代から1990年代に到る電力系統技術発展の歴史的事実を確認し、それが1950年までの設備形成を中心として発展、1980年までの制御技術を中心とした発展、1980年からのシステム多重化を中心とした発展の三段階を経てきたことを示した。

以上の洗い出しと分析に基づき、本研究は、日本における電力系統技術発展の基本構造を以下のように明らかにした。即ち、日本の電力系統技術が社会的ニーズに対応して具体化したシーズは、送変電設備の建設・設置などのハードウェアに係わる設備技術、安定度解析・経済負荷配分・系統保護などのソフトウェアに係わる制御技術、そして、それらをより高度に組み合わせたシステム多重化技術という三側面から捉えることができる。この三側面が、それぞれの変革期に主要な要素として、各時期の社会的ニーズに対応した。

さらに、技術発展の三段階を構造的に分析した結果、各段階が「矛盾の止揚」「体系の定着」「技術の革新」「状況の混迷」の四過程を経て発展し、この過程が各段階で繰り返されることが示され、この分析手法として『『繰り返し』説明モデル』が開発された。結論として、それを日本における電力系統技術の発展に適用した結果、日本の電力系統技術が通史的に三段階を経て発展し、各段階で四過程が繰り返されることが判明した。これら各段階において技術の発展を推進した革新的要素は、設備形成における日本の工業力、制御技術における電子計算機とパワー・エレクトロニクス、システム多重化技術におけるシステムス・エンジニアリングである。これらの要素の技術的発展と電力系統技術の発展とは相互補完的な関係にある。即ち、日本の電力系統技術は、各発展段階における社会的・経済的ニーズに応えるべく技術の革新的要素を導入し、これらを電力系統の状況に合わせて応用し、その積み重ねの上に新たな組み合わせを開発するが、その展開の過程で新たな時代の状況変化に遭遇して混乱と停滞の様相を示しつつ、新たな技術の導入を図るという過程を各段階の中で繰り返してきた。

¹ (株)地球技術研究所：〒151-0053 渋谷区代々木1-54-11(503)

このような分析に基づき本研究は、電力系統計画につき、以下のように考察した。即ち、電力系統技術の中には、歴史的に過去の実績を基礎とし、未来のあるべき姿について合理的かつ実証的という意味で実現可能性の高い計画を策定する手法が、重要な要素として含まれている。従って、電力系統技術者が、環境問題や電力自由化といった電力系統技術を巡る国際的状況を踏まえ、そこに技術発展の新たな契機を見出して、新しい時代における電力系統技術のあるべき姿を構築できるようにこの契機を活かすことは、極めて重要且つ有効であると考えられる。その為に本研究が構築した「繰り返しの説明モデル」を用いて、専門家と社会一般との対話の上に、電力系統技術のあるべき発展方向を見極めることが出来る。

2. 先行研究

電力の生産から流通と消費にいたるシステムを計画し、それを組み立てて運用する上で必要となる解析や制御の技術の体系である電力系統技術について、その発展の歴史に係わる先行研究は、殆ど無きに等しい。しかし、電力系統技術を構成する個々の要素技術については、その発展を分析したものは少なくない。こういった状況のなかで、本研究が採り上げる先行研究は、以下に示すような産業技術史、電気事業史、電気技術史の先行研究の中から、電力系統技術発展の歴史にかかわるものを抽出したものである。

電力産業における技術史の分析として、『産業技術史』(中岡哲郎 他編 I 分野別産業技術史 第1章 動力技術の推移 3-電力 橋本毅彦著²)が挙げられる。なお、『産業技術史』には、本研究の背景となる史実や思想に関して、技術者の倫理を確立する上で、重要で示唆に富む研究が含まれている。前者は、「I 分野別産業技術史 第8章 情報通信産業」(田中国昭著)³であり、後者は、「II 産業技術と社会 第1章 科学者と技術者の社会的責任」(山崎正勝 著)⁴である。

電気事業の発達史に関する先行研究としては、『現代日本産業発達史 III 電力』⁵(栗原東陽 編 現代日本産業発達史研究会)と『電気事業発達史』⁶(電気事業講座編集委員会編)があげられる。前者は、わが国の電力

2 橋本毅彦「動力技術の推移 3-電力」中岡哲郎 他編『産業技術史』, 山川出版社, 2001年, pp. 52-63.

3 田中国昭「情報通信産業」中岡哲郎 他編『産業技術史』, 山川出版社, 2001年, pp. 321-360.

4 山崎正勝「科学者と技術者の社会的責任」中岡哲郎 他編『産業技術史』, 山川出版社, 2001年, p. 411.

5 栗原東陽 編『現代日本産業発達史 III 電力』, 現代日本産業発達史研究会, 1964年.

6 電気事業講座『3 電気事業発達史』, 電力新報社, 1986年.

産業を歴史的に分析する視点として技術的発展を重要なものとして位置付けている点と、特に第二次世界大戦後、わが国が連合軍による占領政策のもとで、如何にして経済発展を遂げることができたのかということの問題意識としてある点は、極めて意義深いものがある。後者は、電力産業の現場にある者によって編纂されているという意味で教科書的存在である。

電気技術史の分析に関する先行研究としては、まず、『新版 電気の技術史』(第4, 5, 6, 8, 10, 11章 山崎俊雄・木本忠昭 共著)⁷がある。次に類書であるが、『電気技術史概論』(第3, 6, 8章 田中国昭 他編著)⁸がある。日本の電力系統技術発展の歴史を見る上で必見の書である『日本科学技術史大系 19 電気技術』⁹は、5巻の通史を含む全25巻のうちの第19巻で、通信・電話と原子力を含む電灯・電力の技術を扱ったものである。

電力技術に注目し、それを社会システムの中で捉えている研究として、『電力の歴史』¹⁰があげられる。この先行研究は「電力システムの形態をきめるうえでは、国家的因子よりは地域的因子のほうが強力に作用した。」¹¹との認識から、ベルリン、シカゴ、ロンドンを具体例として「スタイル」化し、電力システムの形成過程を特色づけている。さらに、この先行研究はこの過程が「総合的なシステム進化のモデルによって、互いに関係づけられる」として、それが「発明と開発、技術の移転、システムの成長、システムの方向転換」といった共通な過程を辿るというモデルとして提示している¹²。

次に、『わが国における電気技術国産化の歴史』(電気学会技術報告 第603号)¹³が挙げられる。これは本研究の筆者がその委員長を務めたことでもあり、本研究の基礎とする史実の集積やその分析手法は、基本的にこの先行研究に通ずるものがある。この先行研究においては、薬師寺泰蔵の提案する「ステージ・モデル」¹⁴が、歴史分析の手法として電力系統技術や高電圧大容量遮断器技術の発展などの分野に適用されている。また、より一般的な読者

7 山崎俊雄・木本忠昭 共著『新版 電気の技術史』, オーム社, 1992年。

8 田中国昭他 編著『電気技術史概論』, ムイスリ出版, 1991年, 第3, 6, 8章。

9 日本科学史学会編『日本科学技術史大系 19 電気技術』, 第一法規出版(株), 1969年。

10 Hughes, T. P., *Networks of Power Electrification in Western Society, 1880-1930*, The Johns Hopkins University Press, 1983, 市場泰男 訳『電力の歴史』, 平凡社, 1996年。

11 同上, p. 5.

12 Hughes, T. P., *Networks of Power Electrification in Western Society, 1880-1930*, The Johns Hopkins University Press, 1983, 市場泰男 訳『電力の歴史』, 平凡社, 1996年. pp. 22-31.

13 技術報告第603号『わが国における電気技術国産化の歴史』, 電気学会, 1996年。

14 同上, p. 10.

を対象として、上記の技術報告を読みやすく編修し、座談会方式による史実の分析を行ったものとして、『技術創造』(石井彰三・荒川文生 共著、朝倉書店)¹⁵がある。

電気技術者として電気技術史の研究に携わった者による著書として『百万人の電気技術史』(高橋雄造著・工業調査会)¹⁶を挙げておく。更に、合衆国における電気技術者として技術史的に電気事業の分析に携った者による著書として *Forgotten Roots—Electric Power, Profits, Democracy and A Profession*¹⁷が挙げられる。

歴史的発展をモデルで説明する試みは、薬師寺泰蔵の「ステージ・モデル」¹⁸を初めとして幾つかなされ、歴史過程に波や繰り返しがあると考えその律動やタイプを調査分析することも行われている^{19, 20}。歴史をモデルで説明する方法の一例は、(財)産業研究所・社会意識研究会による『歴史サイクルに関する基礎調査研究』²¹に見ることができる。

電力系統技術の実態は、電源から負荷に至る電力系統の構成要素を経済や社会など周辺のシステムが求めるニーズに応じた的確に制御することであるといえる。したがって、多くの一般的技術が、動力を発生し、それを伝達し、それによって作業する技術であるのに対し、そのための制御技術は、これらと些か趣をことにすると考えられる。本研究は、このような制御技術そのものの構造を分析しようとするものであるから、制御技術の本質を踏まえておくことが肝要である。制御技術の本質論については、多様な見解があり、多くの蓄積がある²²。それらの検討は、橋本・佐野らによる『テクノ・グローカリゼーション』に集約されていると見ても良いであろう。

3. 歴史的事実

日本の電力系統技術発展の基本的流れを構成する史実を整理するに

15 石井彰三・荒川文生 共著『技術創造』, 朝倉書店, 1999年。

16 高橋雄造著『百万人の電気技術史』, 工業調査会, 2006年。

17 Casazza, Jack, *Forgotten Roots—Electric Power, Profits, Democracy and A Profession*, American Educational Institute, 2007.

18 技術報告第603号『わが国における電気技術国産化の歴史』, 電気学会, 1996年, p. 10.

19 堀比呂志『資源と環境と経済成長—システムダイナミクス手法によるマクロ経済分析—』, 至誠堂, 1974年。

20 社会意識研究会『歴史サイクルに関する基礎調査研究』, 54-1, (財)産業研究所, 1980年。

21 社会意識研究会『歴史サイクルに関する基礎調査研究』, 54-1, (財)産業研究所, 1980年。

22 橋本和美, 佐野正博 他『テクノ・グローカリゼーション』, 梓出版社, 2005年, pp. 52-88.

は、まず、電力系統技術とこれら関連技術との相関関係を明らかにし、それらが技術の内的発展の要因となっている構造を明らかにすることを第一の視点として分析する必要がある。また、日本の電力系統技術発展の基本的流れを構成する史実を整理するには、電力系統技術とその背景をなす社会的・経済的要素との相関関係を明らかにし、それらが技術の社会的構成要素となっている構造を明らかにすることを第二の視点として分析する必要がある。

3.1 1880～90年代

明治維新以降、日本の電力系統技術発展の社会的背景は、その第1期として1880年代から第二次世界大戦の敗北にいたる1945年まで、日本の近代化過程から始まって、殖産興業、富国強兵のスローガンにのり、産業の工業化と社会の軍国主義化へと推移した。社会的背景における近代化と同様に、1880～90年代における日本の電力系統技術発展の経過は、海外からの技術導入を軸として展開している。

電気事業としての電力系統の初期的形態が日本で実現するのは1887年で、その前年に設立された東京電燈(株)が、25kW 210Vの直流送電を特定の需要家に対して開始したときである²³。これは1882年、米合衆国ニューヨーク市における直流送電系統の運転開始に遅れること、僅か、5年であるが、つまりは、そのシステムをそのまま導入・移転したものであることを示している。

一方、日本における交流送電系統の運転開始は、直流に遅れること、僅か、2年で、1889年に大阪において30kW 1155kV 125Hzの送電が開始された。海外における交流送電系統の例は、その前年1888年のロンドン市に見られるものである。これはニューヨークの直流送電系統に遅れること11年となるが、この間、特に合衆国において、直流送電系統による電気事業と交流送電系統による電気事業との異常とも思われる競争が見られる。これに対し、日本における直流と交流の技術的競争は、事業間の経済競争ではなく、事業内の技術的選択の問題に限られ、合衆国のような社会問題とはならず、結果的に、その後の日本の電力系統は交流を中心に構成されてゆくこととなった。例えば、「水力電気事業発祥の地」という石碑が建てられている京都の蹴上発電所が、琵琶湖からの疎水事業に付帯して建設され、1891年には直流550Vの発電機2機をもって事業を開始したが、翌1892年には、同一発電所において交流1000Vの発電を開始し、それ以降は交流系統を中心として京都周辺への電力供給を行った。

この時期の状況が、その後の日本の電力系統構成に大きな特色をもたらすことになる。それは系統周波数の問題である。電力技術導入初期の交流送電における系統周波数は、国際的にも多様であったが、日本では、導入元となる

23 新田宗雄 編『東京電燈株式会社開業五十年史』、東京電燈株式会社、1936年、pp. 21-27.

欧米の技術の相異により多様なものがあった。結果的に、関東地域において合衆国から、関西地域において欧州から技術が導入されることが多く、夫々の地域において有力となっていた系統周波数が、日本でも有力となっていた。すなわち、関東地域において合衆国の50Hz、関西地域において欧州の60Hzがより多く採用されたのである。その技術的背景としては、各地の事業者において指導的な役割を果たした技術者の考え方や意思が、このような結果を齎したと言えよう。

3.2 1900～10年代

1900年代における日本の電力系統は、上記の如く多様な周波数のものがあったが、大方が50Hz、または60Hzの交流で構成されるようになる一方で、電源と負荷とを長距離で結ぶことが技術的にも経済的にも成り立ちがたい状況であった。このため、比較的狭い地域の需要家に電力を供給する電気事業者が、日本各地に多数存在することとなった。一方、電力系統技術の発展は、長距離送電を目指し、豊かな降水量と急峻な山岳地帯に恵まれた日本における水力を利用した発電を可能とするようになった。具体的には、中国地方で11kV 26kmの交流送電が1899年に開始され、1907年には関東地方で55kV 75kmの交流送電が開始された。

さらに、1910年代における日本の電力系統技術の発展は、国際的にも充分比肩し得るものとなる。すなわち、1915年には猪苗代－東京間で115kV 228kmの交流送電が開始され、1918年には、それと同様に豊富な水力資源を電力として東京に運ぶ鬼怒川線(66kV 124km)を用いた電力線搬送通信試験が、世界で初めての成功を収めている。当時の電力系統技術の発展の多くが海外からの技術導入に依存しているなかで、この電力線搬送通信試験のように、日本独自の成果も見られた²⁴。

3.3 1920～30年代

1920年代に入ると、200を超える多数であった電気事業者が過当競争を忌避し、折からの国際的経済不況(金融恐慌)の影響も受けつつ、いわゆる「五大電力」への集中が見られるようになった。その結果、1910年代に発展し始めた豊富な水力資源を電力として需要地に送るための長距離送電の技術が一層の高度化を要求されるとともに、その送電線をどの事業者が所有するのかで激しい競争が行われた。

1930年代における日本の電力系統技術の発展は、再び、その社会的背景として、日本が軍国主義化してゆく状況に強い影響を受ける。すなわち、電力産業が国の基幹産業のひとつであることから、「五大電力」への集中は更に「電力国家管理」への途となった。具体的には、1929年時点で全国発電容量

24 『日本科学技術大系 19 電気技術』, 第6章, 第7章, 1969年, pp. 195-197, p. 223.

の50%を「五大電力」が所有していたことは、1931年の満州事変を背景に1932年に結ばれた「五大電力」のカルテルをもととした1938年の「電力管理法」公布の基盤を整備したものともいえよう。

3.4 1940～50年代

1941年、日本が米合衆国と英連合王国とに宣戦を布告し、1945年、ポツダム宣言を受諾して太平洋戦争が終了した。その後、日本の社会と経済とが敗戦の混乱を克服し、「高度経済成長」の時代を謳歌する1960年代までは、日本の電力系統技術に対する社会的背景の第2期といえよう。

工業施設や民間の被災による電力需要は減退するなかで、山間の地にあった多くの水力発電所は戦災を免れ、また、本州と九州を結ぶ送電線となる関門連絡線が、1945年に竣工しているなど、敗戦直後の電力供給には余力があった。しかし、戦後、1945年から1950年に掛けて電力の供給力は忽ち不足し、「停電」は日常化した。また、1950年に始まる「朝鮮動乱」による「特需景気」から日本の経済は急速な回復を始めた。これに対応すべき日本の電気事業の体制整備は、国家管理的な事業体制を維持しようとする勢力が、産業資本を背景として、民間電気事業者を中心とする電力資本と対決し、事態の混乱が整理できないでいた。これに対し連合国総司令部(GHQ)は、1950年にポツダム政令を発して「公益事業令」等を公布して、いわゆる「電力再編成」を強行した²⁵。このように産業資本と電力資本との調整を占領軍の権力で強行して作られた事業体制は、様々な矛盾を内包するものであった。しかし、このような経済的矛盾にも関わらず、電力系統技術にとって「電力再編成」は、新たな発展の場となった。すなわち、その体制が提供するシステムの大きさが、その後に発展すべき電力系統技術の水準に良く適合していたといえよう。

1950年代の電力系統技術は、主として合衆国の電力系統技術を導入して、1960年代に開花する新たな発展に備えていた。例えば、1951年に電気試験所に設置された交流計算盤は外国産のもので、その後国内5社が購入した。これに対し、電発は国内の計測器メーカーとの共同開発で、他に例を見ない出力まで自動化した「第2世代」の交流計算盤を1957年に稼動した。さらに、1961年には、交流計算盤の要素として発電機台数を増やしたものを開発したが、このような技術が「広域運営」の基盤となっていた²⁶。その後、交流計算盤は電子計算機に置き換えられてゆくの、それが稼動した期間は、日本ではあまり長くはない。しかし、そこで培われた「系統解析」の技術は、国際的にも極めて高い信頼度を維持する電力系統の構成と維持に大いに貢献したものとして注目されるべきである。

25 栗原東洋 編『現代日本産業発達史 III 電力』、現代日本産業発達史研究会、1964年、pp. 381-388。

26 工務部門技術史編集委員会編『先達に学ぶ』、電源開発株式会社、1998年、pp. 483, 484。

3.5 1960～70年代

1957年に発表された「AFCより見た系統特性と変動特性およびその応用」²⁷は、当時、経済学の分野でも活用されていた数理計画法を電力系統の特性解析に応用したものである。数理計画法は、電気事業の経済分析において「経済負荷配分」という各種電源の組み合わせを経済的に最適化する手法として応用されていた。これらの手法は、システムの特性を示す多種で多数の諸元を数学的に分析し処理して、最適値を得るなど所定の結果を得ようとするもので、その背景には大型化し演算の高速化が進む電子計算機の発展があった。この年代における電力系統技術の発展は、このような電子計算機の発展なしに語ることはできない。1966年に出版された『電力系統工学』²⁸は、その初期段階における集大成である。さらにこの技術の実践的な応用としては、例えば、1968年の「フロー交流法・直流法による潮流計算」²⁹等が大いに活用された。

1973年と1979年の二度にわたる「石油危機」は、日本の国民的常識となっていた「右肩上がりの成長」を夢と撃ち砕き、エネルギーと環境の問題を巡って「価値観の変質」をもたらした。このような国際的「圧力」は、1990年代に再び訪れるが、それ以前の1970年代から80年代が、日本の電力系統技術をめぐる社会的背景の第3期といえよう。この変動は、電力系統技術の発展にも大きな影響を与えた。それを示す具体例のひとつは、1973年に出版された『電力システム』³⁰である。この執筆者は電気事業の第一線に従事する電力系統技術者達であったが、電力系統がその境界領域を含む電力システムとして取り扱われることなしにはその最適解が得られないことを、本論文の執筆者を含むこの著作の執筆者らは実感しはじめていた。実際に「石油危機」に遭遇し、それへの対処を具体的に迫られ、彼らは「電力系統将来問題検討会」(AESOP: Approach to the Engineering of Socio-economic Oriented Planning)を組織し、その第一次的成果が、1979年の『電気学会誌』に発表された³¹。そこに示された問題意識と手法は、電力系統技術に携わる若手技術者に引きつがれ、1981年には、この成果に含まれていた「タフネスの評価」などに関する論文が発表されるようになった³²。

27 関根泰次「AFCより見た系統特性と変動特性およびその応用」『電気学会論文誌』, Vol. 77 No. 828, pp. 1220-1230.

28 関根泰次『電力系統工学』電気書院, 1966年.

29 高橋一弘・関根泰次「フロー交流法・直流法による潮流計算」『電気学会論文誌』, Vol. 88-10 No. 961, pp. 1921-1940.

30 関根泰次 編, 荒川文生 他共著『電力システム』, 日刊工業新聞社, 1973年.

31 関根泰次, 荒川文生 他共著「電力系統工学の新しい方向」『電気学会雑誌』, Vol.99 No.2, 1979, pp. 97-100.

32 大山力「不確実な状況における電力系統のタフネスの評価」『電気学会論文誌』, Vol. 101-10, pp. 1921-1940.

3.6 1980年代以降

電力系統技術の社会的背景第3期の後半となる1980年代の電力系統技術は、情報理論の手法なども取り入れつつ理論的に発展していったことが注目される。1984年出版の『電力系統過渡解析論』³³は、その精緻を極めたものといわれ、その後の「状態方程式」や「固有値制御」の研究を支えるものとなった。この頃から実際の電力系統は、その巨大化の矛盾を現わし始める。具体的に、1987年には電力系統における電圧崩壊現象により首都圏で大停電が惹起した。この現象は、系統解析の盲点となっていたもので、1990年以降、この現象の解析に関する論文が多数発表された。

さらに、電力系統技術の社会的背景は1990年代にその第4期に入り、欧州、米州、亜州のそれぞれにおける国際戦略にもとづく動きが直接的に日本の社会や経済に影響を及ぼすようになった。これらに対応すべく、電力系統技術は、一方で状況を一般にも判りやすく説明するための「解析結果の視覚化」や系統の監視や制御における「インテリジェント化」の研究を進める一方、電気事業の「自由化」に対応して、コスト削減という企業のニーズに応える「水力補修」のあり方を検討する論文や、消費者の多様なニーズに応える「電力品質」のあり方を検討する論文が発表されるようになった。このような状況の混迷に内包される矛盾を「インテリジェント化」などの新たな技術を以って止揚してゆく技術がそれなりに定着してゆく過程で、電力系統技術は次なる技術の革新を「マイクログリッド」という技術によって遂げてゆく。これは設備技術と制御技術とが一体化されたシステムを多重化することにより、多様な需要に応じてより信頼度と安定度の高い電力システムを作り上げてゆくものである。

しかし、このような技術革新の背景として、社会状況の混迷が始まっており、それは電力系統技術の発展にも混迷をもたらすおそれがある。例えば、海外では「電力の自由化」が原因のひとつとされる大規模な停電が、2003年に北米やイタリアで発生した。これらの状況は、1970年代の「石油危機」に勝るとも劣らぬ甚大な影響を電力系統技術にも与えるものと考えられている。さらに、先行研究に挙げた*Forgotten Roots*³⁴に示されるような米合衆国における混迷が、日本にももたらされる可能性を持っているという意味で、この状況に適切に対応した電力系統の計画を立てるためにも、国際金融資本の日本市場参入を背景とした「電力自由化」が電力系統技術に及ぼす影響は、看過し得ないものがある。

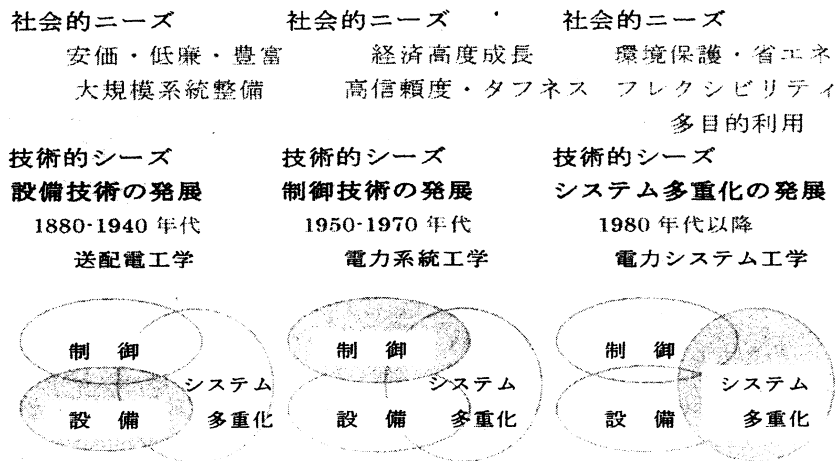
33 関根泰次『電力系統過渡解析論』，オーム社，1984年。

34 Casazza, Jack, *FORGOTTEN ROOTS—Electric Power, Profits, Democracy and A Profession*, American Educational Institute, 2007.

4. 基本構造

4.1 電力系統技術を構成する三側面

本研究は、電力系統技術をそれぞれの社会的背景のなかで見てゆくのであるが、いうまでもなく、電力系統技術は政治・経済・文化の各面における社会的背景のなかで技術に対する要請として形成される社会的ニーズに対応して、電力系統を的確に構成・運用すべく、適用すべき技術的シーズを具体化する。これまで見てきたように、日本の電力系統技術が社会的ニーズに対応して具体化したシーズは、送変電設備の建設・設置などのハードウェアに係わる設備技術、安定度解析・経済負荷配分・系統保護などのソフトウェアに係わる制御技術、そして、それらをより高度に組み合わせたシステム多重化技術という三側面から捉えることができる。



第3・34図 電力系統技術における発展期と技術の特性

第3・34図* は、電力系統技術におけるそれぞれの発展期とそれに対応する技術の特性を図式的に説明するもので、本研究における電力系統技術分析の視点を示す。ここにおいて「社会的ニーズ」は、その時代背景のなかで電力系統技術が受けた主要な影響、或は、社会的要請を示す。「技術シーズ」は、これに対応する電力系統技術のシーズが一体のものとしてありながら、設備・制御・システム多重化の三側面を持ち、それぞれが三つの変革期に主要な要素として、各時期の社会的要請に対応したことを示す。因みに、電力系統技術を研究する学問領域のこれら三つの変革期における名称として、それ

* 本稿の図・表の番号は博士論文に準じる。

それぞれの時代に使用された教科書の名称などから、「送配電工学」³⁵、「電力系統工学」³⁶、「電力システム工学」³⁷を対応させることができる。

4.2 電力系統技術における制御技術の構造

電力系統技術の特質は、ハードウェアの上に成り立つソフトウェアを基盤とする技術である。そのソフトウェア技術の中核ともいえるのが、コンピュータを駆使した情報処理による制御技術である。これを佐野正博による「技術構成要素論的分析に基づく発展段階規定」³⁸に擬えて示せば以下のとおりとなる。

佐野の説明は機械技術を対象としており、その言葉遣いをそのまま電気技術、とりわけ、電力系統技術に適用するのは不都合であるが、技術発展の段階を分析する上での共通性は小さくない。例えば、北村洋基における技術発展の段階図式³⁹によれば、「道具の段階」、「機械の段階」に続く技術発達の「第3段階」は「自動制御の段階」であり、機械の構成要素（動力機、伝達機構、作業機）に加わる第4の要素として「制御機構」が登場するとしている。これを電力系統に引き直せば、発電所などの電源、送電線などの流通機構、家庭や工場などの電気機器等需要に第4の要素として電力系統制御機構が加わるといえる。もちろん、電力系統の構成要素である電源、送電線、電気機器には、もとより、個別に制御装置が装備されているが、電力系統の制御機構は、これら個別の制御装置も含めて電力系統を構成する要素をシステムとして体系的に制御する機構である。その意味で、電力系統技術における制御機構は、電力系統の構成要素である電源、送電線、電気機器から独立したものである。

電力系統技術の発展における「設備形成の発展」、「制御技術の発展」に続いて、「システム多重化技術発展」の段階こそが、北村による技術発展の段階図式における技術発達の「第3段階」として、電力系統技術がもともと本質的に展開する時期であるといえる。

4.3 電力系統技術における発展期

ここで本研究が認識する電力系統技術における三つの発展期について考

35 電気学会編、通信教育会著『送配電工学』、1950年。

36 関根泰次『電力系統工学』、電気書院、1966年。

37 高橋一弘『電力システム工学』、コロナ社、1977年。

38 佐野正博「現代的オートメーションの技術構成要素論的分析に基づく発展段階規定」橋本和美 他共著『テクノ・グローカリゼーションー技術戦略・地域産業集積・地方電子政府化の位相一』、梓出版社、2005、第2章、pp. 42-94。

39 佐野正博「現代的オートメーションの技術構成要素論的分析に基づく発展段階規定」橋本和美他共著『テクノ・グローカリゼーションー技術戦略・地域産業集積・地方電子政府化の位相一』、梓出版社、2005、第2章、p. 54。

察する。この考察の論拠となる歴史的事実の分析から如何なる知見を得るかは、この考察を通じて得られる。ここで図3・34に示した電力系統技術が持つ三つの側面とその制御技術における発展構造の分析に基づけば、電力系統技術における発展の基本構造が、設備形成の発展、制御技術の発展、及び、システム多重化技術の発展という三つの発展期として示される。

まず、設備形成の発展であるが、明治から平成に到る時代の大きな流れのなかで、1880-1940年代に相当する社会的背景の第1期と第2期において、電力系統技術は第二次世界大戦前後を通じ一貫して大規模電力系統の整備という社会的・経済的要請に応えるべく、送変電設備の建設・設置などのハードウェア適用技術という側面を進展させた。明治期にあつては「殖産興業」、1940年代にあつては「戦災復興」という掛け声のなかで、電力系統技術者は、「安価・低廉・豊富」という電力の供給を目的として、海外からの技術導入やその技術の国産化に邁進した。技術的に、この時期において「システム」の概念は全く未熟であり、電力系統の構成要素である電源、送電線、電気機器などには、個別に制御装置が装備されていたが、それらを総合的に制御する技術も未熟であった。学問的にこの分野を扱うものは送配電工学であった。

つぎに、制御技術の発展であるが、社会的背景の第3期中庸、1960年代にあつては「経済高度成長」の下支えとして、電力系統技術は安定度解析・経済負荷配分・系統保護など、ソフトウェア技術の側面を進展させた。これを駆動したハードウェアの最たるものは電子計算機であるが、電力系統技術はその計算能力を活用する上で、数学など他の学問分野の成果も導入して系統解析技術などを進展させた。この時期における電力供給の目的は、量的のみならず質的な安定供給であり、そのため電力系統を高信頼度で建設し、運転することであった。当時、この技術は「タフネス」と呼ばれた。1970年代に「石油危機」が日本の社会と経済にも大きな影響をもたらした。その結果のひとつとして、電力系統技術も1980年代以降は、環境を保護しエネルギーの消費を抑制するという社会的・経済的要請に対応し、いわゆる「省エネ」を目標のひとつとして「タフネス」より「フレキシビリティ」を追求することとなった⁴⁰。さらに電力の質的安定供給の意味も変化し、需要の多様化に基づく電力利用の多目的化に対応してゆくこととなった。

最後に、システム多重化技術の発展であるが、本研究において「システム多重化技術」の意味するものは、例えば、アナログとデジタルの両性能を組み合わせた機能のように、異なる特質をもつシステムを重ねた組み合わせである。このような概念が重要視されてきた理由は、電力系統技術も電力系統に求められる性能も多様化し、従って、それらへの対応も単機能では不可能となり、技術なり機能の組み合わせによる対応が必要かつ有効となっているためと考えられる。

40 Arakawa, Fumio, "From Toughness to Flexibility," Paper presented at CIGRE SC-37, 1987.

5. 分析手法

5.1 電力系統技術発展のパターン

本研究は、日本の電力系統技術の発展をモデル化して説明できるかどうかを検討する。その基礎となるのは、本研究の課題である「日本の電力系統技術発展のメカニズム解明」のため、その技術発展のパターンを明らかにしようとする作業である。この作業の結果を1950-1980年代の「制御技術の発展期」について具体的に示すのが、表4・1である。この表は、各発展期における技術的状况と社会的背景とをキーワードとして示すものを年代順に並べ、それらの相関のなかから、発展のメカニズムをパターンとして分析したものである。

このような日本の電力系統技術発展のメカニズムをパターンとして分析したものが、将来の社会的経済的発展のなかで電力系統技術がどのような方向に発展すべきかを見極めるうえで、判りやすく、納得のゆく合理的な説明となるように、史実分析手法としてのモデルについて検討する。

(過程)	(技術的状况)	(社会的状况)	(年代)
混迷にある 矛盾が止揚	情報工学などの導入 電力系統工学 電子計算機の導入	特需景気 電力再編成 経済運用	1950
技術が体系 として定着	系統連系／電源の大型化 計算機による潮流計算 パワー・エレクトロニクスの応用	広域運営 経済高度成長	1960
新たな技術が 状況を革新	中央給電設備自動化 外輪系統の形成 高電圧直流方式の導入 原子力と揚水の連携	高信頼度へのニーズ (タフネス)	
技術を取巻く 状況が混迷	小規模分散電源	(社会的背景第3期) 自然環境保護政策 石油危機	1970

表4・1 電力系統技術発展のパターン (制御技術の発展期)

5.2 史実分析モデルの例

ヒューズ(Thomas P. Hughes)は『技術的体系の社会的構成』⁴¹⁾のなかで、「巨大な技術的体系の発展」を論じ、「技術的体系(Technological Systems)」を定義しつつ、それが発展する段階を七つに分類している。まず、技術的体系の定義として、それは「混乱し複雑で問題解決的な要素」(messy, complex, problem-solving components)から構成されるものであるとし、具体的に、それ

41 T. P. Hughs, et al., *The social Construction of Technological Systems*, MIT Press, 1986, pp. 51-82.

は物質的人工物(発電機,送電線など),企業組織(電力会社,投資銀行など)や科学的文献,研究開発計画,法令などが体系を構成する。これらの要素は互いに影響しあうので,その特性は体系そのものに起因する。例えば,電力会社の組織はそれが管理する設備の技術的特性によって定まる。また,技術的体系は,発明(Invention),開発(Development),革新(Innovation),移転(Technology Transfer),成長(Growth),競争(Competition),合併(Consolidation)という七段階を経て発展するとしている。技術的体系はこれらの段階まで発展する過程で,独特の様式(Style)と運動量(Momentum)を持つようになるという。

歴史家にとって「モデル」は,どのようなものを示すひとつの例として,電気学会の「電気技術国産化の歴史調査専門委員会」において,薬師寺泰蔵(慶応義塾大学)が「ステージ・モデル」(Stage Model)を提案している⁴²。このモデルの特徴は,技術の伝播を「人」と「改良に関する外部技術の寄与」に力点を置いたモデルであること,また,技術によって駆動されたふたつの産業秩序が出来るということを強調した点である。すなわち,技術の国産化には,ふたつの大きな「山」があり,最初の山は外国技術の模倣成功に関する山,第二の山は改良して国産化に成功する山である。

遮断器技術の発展過程にステージ・モデルを適用したのが図4・3「遮断機技術発展におけるステージ・モデルの例」⁴³である。遮断器は,電力系統を流れる電流を接続または遮断することによって,その構成を状況に応じて変更するという重要な役割を果たす機械装置である。その技術は,電流遮断の際に発生するアーク(電弧)をどのような雰囲気の中で消すかに応じて,油遮断器(OCB)・空気遮断器(ABB)・ガス遮断器(GCB)の三段階に亘って発展してきた。この図は,その各段階において第一次と第二次の「産業秩序」という「山」が現れていることを示している。

ここにおいて重要なことは,まず,夫々の段階ごとにステージ(後に述べる「矛盾の止揚,体系の定着,技術の革新,状況の混迷」に至る過程)が繰り返していること,さらに,前の段階と次の段階との間に時間的(歴史的)重層構造が見られるということである。

42 同上, p. 10.

43 吉永淳・荒川文生「高電圧遮断器技術開発の歴史的分析」,『電気学会論文誌A』,第121巻1号,2001年,p. 17.

ノード番号・条件	OCB関連事象 (数字はノード番号)	ABB関連事象 (数字はノード番号)	GCB関連事象 (数字はノード番号)
1. 初期条件	1. 海外品輸入	1. ノースラト方式ABB	1. 特許使用権失効
2. イミテーション及び 第1次エミュレーション	2. 製作会社設立 模倣・試作	2. 地下変電所用 24kVABB	2. 二重圧力式開発
3. 第1次産業秩序	3. 国産品普及拡大	3. 24/36kV級ABB 使用拡大	3. 二重圧力式550kV GCB
4. 技術の運び屋 及び移転	4. Slepian消弧理論 消弧室技術導入	4. BBC方式発表	4. 二方向吹付単一 圧力方式
5. 制約条件のアーティ ュレーションと外生性	5. 鉄・油の節約できる 磚子形OCB	5. 300kV 50kA 2サイクル要求	5. 宮城沖地震 耐震対策
6. 優勢と新規性	6. 朝鮮、満州電源開発 220kVOCB	6. ユニット組合せ 保守・点検性	6. タンク形 GCB GIS開発
7. 主要なブレイク	7. 高電圧・大容量化 (275kV系運転開始)	7. BBC製品輸入 米国ABB導入	7. 550kV系統拡大 系統連系
8. 第2次エミュレーション と第2次産業秩序	8. 高性能タンク形 OCB開発・普及	8. 300kV国産品導入 ABB時代の到来	8. 300/550kV 63kA GCB
9. 優勢維持	9. OCB競争力の蓄え 拡大・輸出	9. 初の550kVABB	9. 1000kV、80kA級 GCB
10. 技術の零れ落ち とブレイク効果	10. 高電圧高速化 ABB出現	10. 抵抗遮断 SLF遮断能力	
11. 危機管理 或いは凋落	11. 高圧大容量進展 GCB出現	11. GCB参入 SLF遮断良好	

図4・3 遮断機技術発展におけるステージ・モデルの例

出典：吉永 淳・荒川文生「高電圧遮断器技術開発の歴史的分析」p. 17.

5.3 「繰り返し」説明モデルの構築と提唱

ステージ・モデルの改訂を試みた結果として得る説明モデルは、よくいわれる「歴史は繰り返す」という命題を、単純にはそれを肯定できないという意味と共に、受け入れたものなので『繰り返し』説明モデルと名付けた。『繰り返し』説明モデルの発想は、上記の遮断器技術発展の分析の中から生れたものであるが、日本の電力系統技術発展を通史として分析するという、より大きな歴史的展開にステージ・モデルを適用するに当たっては、ふたつの山が現れる各「段階」もより大きく捉えられなければならない。つまり、繰り返し現れる「山」の意味を言葉だけで捉えると極めて曖昧であるが、その本質的な意味を考慮すると、ひとつの「技術」（電力系統技術でいうと電力系統を構成する個々の要素に関する技術の組み合わせ、もしくは、その中で主要な役割を果たす技術）が、「矛盾の止揚」、「体系の定着」、「技術の革新」、「状況の混迷」という発展の過程、即ち、立ち上がりから最盛期を経て収束するまでの過程を辿る変革の時期を意味している。従って、この「山」を「変革期」と捉えることができる。即ち、表4・4『繰り返し』の説明モデルは、その要素としての史実は異なっていると捉えられるが、「型」としては歴史が繰り返していることを、技術と社会との相関的因果関係において年代的に提示している。

表4・4 「繰り返し」の説明モデル (日本の電力系統)

段階	過程	(技術的状況)	(社会的背景)	年代
			明治維新	(第1期)
第1段階		設備形成の発展		
	矛盾の止揚	電気技術導入 交流と直流・周波数選択に関する日米同時性	欧米の電気事業	1880
	体系の定着	送電線亘長・電圧の向上 電力の統一		1920
	技術の革新	送配電網の整備 (串型系統の形成)	電力市場競争 五大電力 電力統制	1930
				(第2期)
	状況の混迷	発送電一貫体制	国家管理・消費規制 第二次世界大戦 深刻な供給不安	1940
第2段階		制御技術の発展		
	矛盾の止揚	情報工学などの導入 電力系統工学 電子計算機の導入	特需景気・ 電力再編成 経済運用	1950
	体系の定着	系統連系/電源の大型化 計算機による潮流計算 パワー・エレクトロニクスの応用	広域運営 経済高度成長	1960
	技術の革新	中央給電設備自動化 外輪系統の形成 (タフネス) 高電圧直流方式の導入 原子力と揚水の連携	高信頼度へのニーズ	
				(第3期)
	状況の混迷	小規模分散電源	自然環境保護政策 石油危機	1970
第3段階		システム多重化技術の発展		
	矛盾の止揚	デジタル制御技術 自律分散制御	社会的価値観の変質 規制緩和	1980
	体系の定着	デマンドサイドマネジメント リアルタイム料金	独立電気事業者参入 信頼度概念の変化	1990
			(フレキシビリティ)	(第4期)
	技術の革新	マイクログリッド システムの多重化		
	状況の混迷	エネルギー環境システム	電力自由化・電力取引 国際資本の事業参入	2000
第4段階 (計画案)		地球規模技術の発展		
	矛盾の止揚	ユビキタス システム	国際的技術交流	
	体系の定着	新エネルギー・超電導	国際貢献	

この説明モデルが示唆していることは、日本の電力系統技術がこれまで三つの発展期を経過し、これから新たな発展期を迎えようとしているということである。その理由は、技術の発展が見られる前段で必ず停滞期（技術が困難に遭遇する時期）が見られるからである。

最初の発展期は、明治維新という混乱と停滞の後に到来した近代化の課程が達成した設備形成の発展という発展形態である。その後、太平洋戦争の敗北という混乱と停滞の時期を超えて、投入された技術と資本により制御技術の発展というふたつ目の発展期が達成された。さらに、石油危機という混乱と停滞の時期を超えて、日本の電力系統技術は、新たな技術的展開を図りつつシステム多重化技術の発展という変革期を形成した。その技術は「フレキシビリティ」（柔軟性）というキーワードで示されるもので、ソフト技術とハード技術を組み合わせたハイブリッド型の技術である。現在、日本の電力系統技術は、その後のバブル経済破綻に加えて、電力自由化という「外圧」に拠る混乱と停滞の時期を迎えているが、これを克服した後の展開は、次章に詳述する如く、技術と社会の地球規模における国際化、即ち、地球規模技術の発展である。

「繰り返し」説明モデルが既存の説明方式に対して持つ優位性を示す為に、表4・5に示すように、ヒューズのモデル(1)、薬師寺のモデル(2)、吉永・荒川のモデル(3)と「繰り返し」説明モデル(4)とを比較してみる。

モデル	(1)	(2)	(3)	(4)	備考
項目	ヒューズ	薬師寺	吉永・荒川	「繰り返し」	
構成	7段階	(2ステージ) 11ノード	3段階 各11ノード	3段階+1 各4過程	(3): ノードに繰り返し (4): +1は計画段階. 4過程の繰り返し
適用対象	技術的体系	技術移転の過程	遮断器技術	電力系統技術	
適用目的	技術的体系の地域的比較	技術と社会の相互作用の表現	技術発展の共通性発見	計画の合理性と実証性を担保	
特色	技術の成長後に競争と合併	二つの産業秩序(エミュレーション)	技術発展と政策介入の分析	120年の通史的 分析から将来を計画	(4): 工学としての歴史研究
参照	第4・1・3項(1)	第4・1・3項(2) 表4・3	第4・2・1項 図4・3	第4・3・2項 表4・4	

表4・5 モデル比較

各モデルの構成が、何れも歴史的事実を生起した時期に応じて区分する事は共通で、これがモデルのモデルたる所以でもあろうが、その区分を表わすのに、「段階」、「ステージ」、「ノード」、「過程」、或いはその組み合わせなど、区々となっている。そのひとつの理由と考えられるのは、それぞれのモデルが対象とする期間の違いである。(1)は第一次世界大戦後の十数年を対象とし、(2)と(3)は第二次世界大戦に前後する30年から50年、(4)は1880年から2000年に及ぶ120年と言う長期間を対象としている。しかし、対象期間が長いからといって、区分数が多いわけではない。要は、当該モデルが何を説明しようとするかに応じて、時期的区分の数が変わって来るのである。此处で重要なのは、(3)と(4)とが事象の生起に繰り返しを見ていることである。(3)においては、11のノードに3段階の繰り返しがあると分析するので、事象の区分数は33となる。いっぽう、(4)では、4過程からなる1段階が120年で3回繰り返したと見るから区分数は12であるが、これが今後も繰り返すと見れば、対象期間が延びればそれだけ区分数も大きくなる。これが意味するものは、(1)、(2)、(3)が静的な分析に留まるのに対し、(4)は静的な分析に加えて動的な発展を見ようとしていることである。

本研究において開発した「繰り返し」の説明モデルは、(1)、(2)、(3)のモデルが築き上げた成果をもとに、(1)や(2)が持つ限界、即ち、技術は過去の積み重ねの上に立って、社会的構成の変化に応じて継続的に発展してゆくものであるという本質を見失い、或いは、(3)とともに静的な分析に留まっているという限界を克服するものである。このモデルは、これらの成果である静的な分析をもとにこれを動的に活用し、電力系統技術の主要な手法の一つである系統計画を合理性と実証性を担保するものとして実践することを目的として、電力系統技術発展の歴史をモデルにより分析するものである。その結果、電力系統技術発展の歴史120年の通史的分析から将来を(予測ではなく)計画する根拠を明らかにしたが、こういった手法は、電気学会における「電気技術国産化の歴史調査専門委員会」における活動をもとに、石井彰三(東工大)が提唱した「工学としての歴史研究」を実践するものである⁴⁴。

以上の分析から判るように、「繰り返し」説明モデルが既存の説明方式に対して持つ優位性は、次の2点である。

分析の対象となる技術の発展をひとつの時代で収束させることなく、未来へ向けて展望を拓くことができる。

歴史の「繰り返し」(反復性)の中で過去の反省を未来に活かす発想を取り込むことができる。

さらに、この表の中に散りばめられたキーワードを巡って、さまざまな議論ができ検討がなされ得る。その発展の過程を分析する中から新たな示唆も得られよう。このことが判り易く納得の行くものとして、この説明モデルから読み取れば、この説明モデルの構築には意味があるといえる。

44 石井彰三・荒川文生 共著『技術創造』，朝倉書店，1966年，pp. 27, 28.

5. 結 論

電力系統技術の中には、歴史的に過去の実績を基礎とし、未来のあるべき姿について合理的かつ実証的という意味で実現可能性の高い計画を策定する手法が、重要な要素として含まれている。従って、電力系統技術者が、環境問題や電力自由化といった電力系統技術を巡る国際的状況を踏まえ、そこに技術発展の新たな契機を見出して、新しい時代における電力系統技術のあるべき姿を構築できるようにこの契機を活かすことは、極めて重要且つ有効であると考えられる。その為には、本研究が構築した「繰り返しの説明モデル」を用いて、専門家と社会一般との対話の上に、電力系統技術のあるべき発展方向を見極めることが出来る。技術の発展に於ける繰り返しは、未来に於いて同じ内容で展開されるわけではなく、背景となる社会的状況に応じて異なる内容となって現れる。それがどのようなものであれば正当かつ的確であるかを、技術者としての倫理観に基づいて判断しつつ、国民大衆の意思決定に委ねるべき計画として提示するのが、技術者としての専門性発揮の途であり、社会的責任の実践でもある。こうして社会に呈示される計画は、国民大衆の合理的で、事実に基づく判断の基礎を提供し、民主的な意思決定の根拠となる。

A Study on the Development of Japanese Power Systems Engineering

ARAKAWA, Fumio*

The purpose of this study is to demonstrate, through the historical study of the Japanese power systems engineering development, desirable characteristics of power systems in Japan that will be necessary to cope with the issue of current global environmental protection and of the deregulation of power industry. The task is to collect and study historical data in terms of engineering development, to clarify the fundamental structure of power systems engineering by analyses of historical data, and then to develop an analytical method to study these data.

The historical data in terms of power systems engineering has been studied in the context of Japanese social and economical development. The resulting analytical review suggests that the fundamental structure of power systems engineering is composed of three phases: Equipment, Control and Over-lapped systems. Each of these three phases, defined in terms of power systems engineering development in Japan, characterizes the development in the 1880's to the 1940's, the 1950's to the 1970's and the 1980's to the 2000's respectively.

Major previous works aimed at developing analytical methods and models to study the history of power engineering are those done by Hughes, Thomas, P. and Yakushiji, Taizo, etc. In cooperation with Yoshinaga, Jun, this author himself developed a model. Coping with some shortcomings in those works and expanding their rather static ideas into a more dynamic model, the present study has developed a new history model, named "The Repeat Model." The model is developed on the basis of reviewed historical data in Japan. It shows that there are four sub-stages of Sublation, Application, Innovation, and Turbulence, repeating in the every three stages of Equipment, Control and Over-lapped Systems Engineering Development.

The repetition of four sub-stages in the following stage, which shall be named as "Global Systems Engineering Development," will not simply come out itself, since it depends on social and economic background in the new stage. As the idea of repetition will provide planners with a sound basis for judgment and the public with reliable basis for judgment in the democratic civil society, The Repeat Model is quite productive for reasonable power systems planning on the basis of historical data.

* Global Engineering Institute, Inc.: 1-54-11 (503) Yoyogi, Shibuya, Tokyo, JAPAN

19 世紀末ドイツの熱輻射実験の展開

—目的・機器・機器構成を介しての実験プログラムの相互交流—

山崎研究室 小長谷大介

序章 課題の設定

1. はじめに

物理学分野のほとんどは研究し尽くされ、わずかばかりの小さな問題が残されているに過ぎないと考えられた 1870 年代から一転し¹, 19-20 世紀転換期の物理学界では、それまでの基本概念や基本原理の否定的見解が大きな力を持ち始めていた。実証主義的な Mach 主義、現象論的立場をとるエネルギー論が現れ、原子論は科学的唯物論として批判され、従来の物質概念を前提にしない新たな理論的枠組みの体系化が図られた²。ヨーロッパ科学界の重鎮 Kelvin 卿や、H. Poincaré は、エネルギー等分配則への疑い、Michelson-Morley 実験のエーテル非検出、放射能のエネルギーの大量放出、運動の相対性原理と電磁理論との矛盾を問題視して、古典論に基づく物理学の危機感を顕わにした³。これらの問題は 20 世紀最初の数十年をかけて量子論や相対性理論の形成によって解消されていくが、その問題の深刻さは世紀転換期にすでに認識されていた。エネルギー等分配則への不信、反原子論、電磁理論の出現と関連した熱輻射のエネルギー分布の研究も深刻な問題の一つだった。熱輻射の問題は、当時の諸課題を包括していたことに加えて、「エネルギー量子」誕生という量子論の出発点を与える、古典論から非古典論的物理学への架け橋となる研究課題だった。

従来の熱輻射に関する科学史研究は、Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wien, Max Planck らの理論的研究の詳細を明らかにし、科学的概念の基盤が 19-20 世紀転換期を経て変化していく過程の断面を示してきた。次節で示すように、そこでは、熱力学、気体分子運動論、統計力学、電磁気学などと格闘する Planck らの姿が描かれていた。だが、彼らは、理論をどのように組み立てるかについてだけでなく、当時の実験研究の動向にどのように対応させるかということにも頭を悩ませていた。19 世紀末の熱輻射研究では、実験結果と理論の関係がめまぐるしく変化し、実験結果と理論との関係については、はっきり決まった見解が存在していたわけではなかった。理論研究も実験研究も何を基準として考えるかを模索している段階だった。

しかし、理論と実験のそれぞれに起伏に富む展開が見られた 19 世紀末の熱輻

¹ Cf. A. ヘルマン著 (生井沢寛・林憲二 共訳) 『プランクの生涯』東京図書, 1977 年, 10 頁。

² Cf. Helge Kragh, *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century* (Princeton: Princeton University Press, 1999). 特に Ch.1, 3-12. ; 広重徹『物理学史 II』培風館, 1968 年, 46-61 頁。

³ Cf. 西尾成子・高田誠二「Kelvin 卿の暗雲—その第二は等分配か熱輻射か」『物理学史ノート』第 7 号(2001 年 9 月), 5-8 頁.; 広重徹, 1968 年, 46-47 頁。

射研究に関して、先行する科学史研究では、エネルギー量子という科学的概念の起源を探究する問題意識に引きずられ、大半の科学史的分析が概念的、理論的足跡に向けられてきた。実際には、実験と理論の研究が連動して、Planck 分布式や「エネルギー量子」という成果をあげたにもかかわらず、そこでは、理論的視点ばかりが取り扱われてきたのである。これに対して、本研究は、エネルギー量子の誕生過程における熱輻射の実験的基盤を明らかにして、新しい科学的概念の誕生と実験研究の関わりを示そうというものである。

2. 関連する先行研究と本研究の課題

前節で述べたように、熱輻射に関する科学史研究の多くは、これまで量子概念やその誕生に絡む Planck 分布式の理論的起源を探ることを主題としてきた。例えば、M. J. Klein が 1962 年論文で取り組んだ問いは、「Planck は、Rayleigh が古典物理学の不可避の結果として得た輻射分布法則に気づいていたのか」、そして「Planck が、エネルギー量子を用いたエントロピーの統計計算において、どのように Boltzmann の方法から逸脱したのか」であり⁴、その問いに対して Klein は、エネルギー等分配則から距離を置く「Planck 自身の研究とそれが行われた文脈」に沿ってそれに答えた。また、Klein は、1966 年論文で、エネルギー要素（エネルギー量子）導入後の Planck についても、Boltzmann の確率論的解釈と「量子」の理解の関係がどのように考えられていたかを追った⁵。同じ 1966 年には、辻哲夫が、熱力学第一法則と第二法則に関係する「保存的作用による非可逆過程の解明という課題」を、Planck 熱輻射論の主なねらいとみなす見解を発表した⁶。辻は、熱力学的方法を採ったものの、それを途中で断念し、気体分子運動論的方法を取り入れた Wien の方法と、Planck の方法の違いを明らかにした。T. Kuhn は、1978 年の著作で、熱力学第二法則を電気力学と調和させようとする当初の Planck の熱輻射研究に、Boltzmann の原子論的アプローチが導入されたことがエネルギー量子誕生に結びついたことを示した⁷。さらに、井上隆義は 1996 年に、Planck の 1890 年前後の物理化学研究における非平衡問題への取り組みと、1890 年代半ば以降の熱輻射研究との深い関係に触れて、Planck の熱輻射研究への固有な経緯を明らかにした⁸。

時代を遡ると、高林武彦は 1962 年の『自然』11 月号、12 月号に「マックス・

⁴ Martin J. Klein, "Max Planck and the Beginning of the Quantum Theory," *Archive for History of Exact Sciences* 1(1962): 459-479. 引用は 459-60.

⁵ M. J. Klein, "Thermodynamics and Quanta in Planck's Work," *Physics Today* Vol.19. No.11 (1966): 23-32.

⁶ 辻哲夫「熱輻射論と古典理論の変換」辻哲夫監修『現代物理学の形成』東海大学出版会、1966年、9-73頁。引用は39頁。

⁷ Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* (New York: Oxford University Press, 1978). この著書の主眼は、1900年を過ぎてもしばらくの間、いかに物理学者のなかに量子概念が受容されていなかったかという点である。

⁸ 井上隆義「Max Planck の熱力学(その2)―熱輻射研究への移行をめぐって―」『物理学史―その課題と展望―』No.9(1996年)、22-35頁。詳細は本論第6章第1節を参照。

プランク」と題する論文を発表し、熱輻射の理論研究における Planck の特徴を示していた⁹。その特徴は四つあった。一つは、「空洞輻射という本質的に純粹で絶対的な問題に意識的に取り組んだことであった。実際熱輻射はプランクが信じたように物質の特性によらない絶対的・普遍的なものであり、このような問題の徹底的な追求によってこそ、はじめて革命的な原理である量子を確実につかまえることになったのである」。二つ目は、「プランクが熱力学の立場を迂回したうえで、これを基礎づけるものとしてエントロピーと確率をつなぐ原理にすすんだこと、そしてこれらを最後まで保持したことである」。三つ目は、「振動子という幸いなモデルの選択である」。四つ目は、「プランクが理論家にふさわしく、ヴィーンなどを比して、問題のオーソドックスな正面攻撃をしていったこと、しかもそのさい彼があまり統計力学の玄人でなかったこと、そして一般にあまりにクリティカルにすぎなかった」ことであった¹⁰。クリティカルに過ぎずというのは、Planck が「古典論の矛盾（レーリー発散）をとらえて、意識的に古典論を破ろうしたのではなく、むしろ気がついたら古典論を破っていた、という成行き」を意味していた。高林は、大雑把ながら、当時の物理学界の動向と Planck の研究の違いを端的に示した。高林は、さらに「以上あげたほかにプランクの成功に関してはいろいろな理由や条件があるが、特に忘れてはならないことは、(中略) ...ベルリンが大学、PTR (帝国物理工学研究所：引用者)、TH (工科大学：引用者) をあげてこの一見地味な熱輻射の問題や、これに関連する方面に研究を集中しており、ことにそこで精度の高い測定が進行していたことである」と述べたものの¹¹、その本格的な研究に立ち入ることはなかった。

これらの理論分析に傾斜した先行研究の問題は、Allan Franklin らの引用によく表現されている。Franklin は、『実験の無視』(1986 年)の序文で、熱輻射研究に携わった実験科学者の「Lummer と Pringsheim は死んでいる」と記した¹²。この記述は、熱輻射に関する科学史では、理論の流れが主に取り上げられ、Planck から理論科学者の仕事が強調されてきたのに対して、実験科学者たちの仕事はほとんど目を向けられることなく歴史的に瀕死状態にあることを表していた。また、Brian Pippard 卿は、『20 世紀の物理学』(1995 年)の「黒体放射」の項目において、その「理論がどのように発展したかの完全な記述は」、M. J. Klein と T. Kuhn が「与えているので、われわれはここでは実験にしぼって」述べると書いていた¹³。Pippard 卿が紹介した実験内容は、S. P. Langley のボロメーター開発、

⁹ 高林武彦「マックス・プランク」(『自然』1962 年 11 月号, 12 月号) 高林武彦著『現代物理学者の創始者』みすず書房, 1988 年, 9-56 頁。

¹⁰ 同上, 47-50 頁。

¹¹ 同上, 51 頁。

¹² Allen Franklin, *The Neglect of Experiment* (Cambridge: Cambridge University Press, 1986), 1. この引用文は、以下の文献で先行して引用されている。Dieter Hoffmann, “On the Experimental Context of Planck’s Foundation of Quantum Theory,” *Centaurus* 43(2001): 240-259. 該当箇所は 240.

¹³ 「20 世紀の物理学」編集委員会編『20 世紀の物理学 I』丸善, 1999 年, 24 頁。M. J. Klein, 1962.; T. S. Kuhn, 1978.

L. Holborn と W. Wien の熱電対の温度目盛研究, W. Wien と O. Lummer の空洞熱輻射源の提案, 1890年代末の O. Lummer と E. Pringsheim の熱輻射測定の実験構成に寄与した F. Paschen の蛍石プリズムの分散に関する研究だった。A. Franklin と Pippard 卿の引用は, 世紀転換期の熱輻射研究に関する従来の科学史研究が, 理論と実験を非対称に扱ってきたことを物語っている。

だが, 理論史的展開を扱うだけではない先行研究も若干存在した。天野清は1943年の著作で, 「量子論は, マックス・プランクが黒体輻射の実験的事実を説明するために量子仮説を導き入れたところに誕生したと説かれるとき, 黒体輻射はどうして実験されるものか, なぜ量子仮説が必要なのか」と問いかけ, 「量子論の起源が科学史の重要問題を如何に豊富に含蓄して居るか」という広い問題意識をもっていた¹⁴。彼の記述には, ドイツガス・水道連盟が「標準蠟燭とヘフネル燈との精密な比較」の仕事, 帝国物理工学研究所(Physikalisch-Technische Reichsanstalt, 以下 PTR と略)に「依頼した」ことや, 「輻射研究の最初の動機」が PTR 「工学部の光度単位に関するものであった」ことが触れられ, 当時のドイツの産業状況と熱輻射研究の関連が指摘されていた¹⁵。David Cahan は1989年に, PTR の誕生と初期の発展史を描くなかで, 「産業的関心が, PTR による黒体輻射研究の背景となっていたこと」を示した¹⁶。これらは, 19世紀末の熱輻射研究を社会史的に扱ったと言えるだろう。

天野清は, 広い問題意識の下, Boltzmann, Wien, Planck らの理論研究とともに, Paschen, Lummer, Rubens らの熱輻射実験の研究動向にも触れて, 近世初期に端を発するヨーロッパの陶磁器研究と深いつながりをもつベルリン王立磁器製造所と, 熱輻射実験のインフラとの関係にも言及していた¹⁷。天野のような, 熱輻射の理論研究と実験研究の流れを並列的に描出した研究には, Hans Kangro による著作(1970年)もある¹⁸。彼の著作は, 産業界の影響という視点から距離を置き, 熱輻射研究の主役があくまで科学者であることを意図して, 純粋科学としての熱輻射研究の理論的および実験的展開を詳細に描いている。そこには,

¹⁴ 天野清訳編『ウィーン, プランク論文集 熱輻射論と量子論の起源』大日本出版, 1943年 [Kiyoshi AMANO (Translation into English by Seiji TAKATA and Shin-ichi HYODO), *Historia Scientiarum* Vol.10, No.2 (2000): 185-210.; Vol.10, No.3 (2001): 255-280.]引用文は, はしがき II-V。

¹⁵ 天野清, 1943年, 21-22頁。

¹⁶ David Cahan, *An Institute for an Empire The Physikalisch-Technische Reichsanstalt 1871-1918* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989). 引用箇所は145。また, 高田誠二氏は, 天野と Kangro の文献の諸見解を比較するなかで, 「Kangro は PTR の物理部門の仕事の独立性, 自主性を論証しようとしているかに思われ」と述べている。高田誠二「ふたつの量子論起源史—天野の場合と Kangro の場合—」『物理学史研究』Vol.8 No.3(1972年09月号)81-90頁。引用文は87頁。

¹⁷ Cf. 天野, 1943年, 57頁。

¹⁸ Hans Kangro, *Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes* (Wiesbaden: Franz Steiner Verlag, 1970). [Hans Kangro, *Early History of Planck's Radiation Law* (London: Taylor and Francis, 1976)]

イギリスの J. Tyndall, フランスの A. Crova, アメリカの S. M. Langley らによる 1880 年代以前の熱輻射測定から始まり, 1880 年代後半のロシアの W. A. Michelson やドイツの H. F. Weber らによる熱輻射分布式の研究, そして, 1890 年代以降のドイツの H. Rubens, F. Paschen, O. Lummer らの実験研究, W. Wien, M. Planck らの理論研究が時代順に描かれていた。PTR での実験についても, Kangro の見解を反映し, 「産業的関心」から一線を画する形で詳述されていた。

さらに最近になり, 熱輻射の実験研究だけを取り上げる研究もわずかながら現れている。Dieter Hoffmann は 2001 年に, ベルリンの PTR で活躍した Lummer らによる実験研究およびその技術に注目した論文を発表し, Andrea Loettgers は 2003 年に, アメリカ人天文学者 Langley のポロメーター開発の全体像を描いた論文を発表した¹⁹。Hoffmann らの研究は, 特定の実験科学者の成果を見るにとどまっているが, 熱輻射研究の実験面に光を当てたという点で重要である。

19 世紀末の熱輻射研究に関する先行研究を概観すると, 関連する科学史研究の大半が理論史的分析に向けられながらも, 実験面を取り上げる科学史研究も若干存在していた。それらの実験研究の取り扱い方は様々であった。天野は, どちらかと言うと, 個々の実験研究者の仕事に深入りせず, 熱輻射研究の全体的流れを描くことに主眼をおいて, 当該研究と当時の社会的背景との関係も分かり易く提示している。Kangro の研究は, 熱輻射研究に関わるできる限り多くの理論研究者・実験研究者の仕事を詳述しているが, 各研究者の研究内容を列挙することに終始した感が強く, 科学者間・研究結果間の関連性や相互交流などの熱輻射研究の全体像に関わる点にはほとんど触れていない。Cahan の研究は, ドイツ産業界の要請が PTR 経由で熱輻射研究を促進した事例を示しているが, PTR の歴史を描くという目的から, 制度史的色彩が強く, 実験研究の内容にまで踏み込むことはしていない。Hoffmann, Loettgers の研究は, Lummer, Langley という単体の科学者の仕事に関して詳しいながら, 他の科学者との相対比較や相互交流という点の考察は十分ではなく, 実験研究全体の雰囲気を示すものではない。各先行研究には, 個別の実験研究の内容を詳述するなどの長所が見られるものの, 個々の研究間の関係や相互交流, それらの絡む実験研究の全体像を示すものはなかった。

また, 先行研究の大半を占める理論史的分析によってつくり上げられた実験の扱い方の問題点も見られる。例えば, Klein は 1962 年の論文で, Planck と Rayleigh 分布法則との関係, Planck の理論的方法と Boltzmann の方法の関係を考察する際, 二つの実験関連事項に触れた。一つは, Wien 分布法則の計算値と実測値の深刻なずれを示した, 1899 年の Lummer と Pringsheim による実験結果であり, もう一つは, Planck 分布法則の案出を促した, 1900 年の Rubens と Kurlbaum による残留線の実験結果である²⁰。両者の実験結果は, Wien 式から Planck 式へ

¹⁹ Dieter Hoffmann, "On the Experimental Context of Planck's Foundation of Quantum Theory," *Centaurus* 43(2001): 240-259. ; Andrea Loettgers, "Samuel Pierpont Langley and his Contributions to the Empirical Basis of Black-Body Radiation," *Physics in Perspective* 5(2003): 262-280.

²⁰ M. J. Klein, 1962, 464.

の重要な契機となったため触れられたが、Kleinは理論的結果の検証材料として、彼らの実験結果に言及したに過ぎない。この触れ方は、理論研究の進展に直接絡む幾つかの実験結果に注目するが、実験研究がどのように行われたかは考えないものだった。これが従来の大半の先行研究における実験の象徴的な扱い方である。多くの先行研究では、熱輻射の実験研究は理論的結果の検証役としてのみ登場し、実験結果に至るまでの文脈からは切り離されていた。

19世紀末に熱輻射のエネルギー分布の測定に携わっていた実験科学者たちは、理論研究で得られた輻射法則の確証だけを目標としていたわけではなく、独自の目的、問題意識をもっていた。1890年代を通してエネルギー分布を測定したハノーファーのPaschenは、所属先の上司の可視・赤外分光学研究に関わるなかで、熱輻射のエネルギー分布に関心をもち、その測定に携わった。1899年末から1900年初めにかけてWienのエネルギー分布法則と実験結果の不一致を見出したベルリンのLummerは、所属先の光度標準研究と絡めて、測定器や光源の開発・研究を行い、その開発の進行具合をエネルギー分布測定の結果などで計っていた。1900年末にPlanck分布法則を確証したベルリンのRubensは、Maxwell理論の遠赤外領域への適用を意識して、長波長の輻射線の検出や光学的性質の検証を行うなかで、エネルギー分布測定と出会っていた。実験研究者たちの各々の研究内容やそれを取り巻く諸環境に目を向けると、彼らの実験研究は単なる熱輻射理論の検証役ではなく、多様な意図をあわせもつ活動群だったことが分かる。

また、経緯や目的が異なるPaschen、Lummerらの研究間にあっても、熱輻射現象やその波長スペクトルの測定を扱うという点で共通点があり、それらの研究間では、測定機器や機器構成（機器の組み合わせ）に関する相互交流も見られた。1892年にLummerとKurlbaumが携わった輻射測定器の検出素子（白金）の加工法は、その後のPaschenやRubensらの研究にも導入され、輻射線の検出効果を高めた。1894-1895年にPaschenとRubensが別々に行った各種プリズムの分散式の確証研究は、1899年のLummerのエネルギー分布測定に活用され、プリズム使用に関する重要な先行研究となった。さらに、1890年代前半に採用したPaschenの熱輻射実験の基本構成は、Pringsheimが赤外線測定で採用した機器構成、Lummerらの検出素子の加工法、Rubensらの開発したガルヴァノメーター（微弱電流計）、Rubensの金属選択反射の研究結果などが活用されることでくり上げられていた。この基本構成は、後のLummerらの実験にも採用された。多様な意図をもつ実験活動は、ときに相互交流して、熱輻射の実験研究の発展を促していた。

熱輻射実験の多彩さ、その変化に富んだ発展の仕方は、先行研究では十分に描かれてこなかった。そこで、本研究は、熱輻射研究の実験活動における、複数の意図をもつ「実験プログラム」の存在とそれらの相互交流に注目する。「実験プログラム」とは、簡単に言えば、実験家もしくは実験グループによる、一定の目的をもつ実験研究の一連の構成を意味する。

実験活動への考察にあたっては、熱輻射実験で主に活躍した実験家とその共同研究者を取り上げ、彼らがどのような目的で熱輻射実験に携わり、その目的に合わせてどのような機器を開発・採用し、実験のための機器構成の採用・調整を進

めたかを見ていく。目的に関しては、熱輻射実験に至る経緯の異なる各実験家独自の目的に注目する。実験機器および機器構成に関しては、実験家たちの研究は一樣ではなく、それぞれ異なる目的をもち、異なる研究環境にあったことから、相異なる「実験プログラム」を採用し、その違いが各実験家の採用する機器や機器構成にも反映していた点に注目する。また、実験家間において、共通する実験機器・機器構成を扱うが観点を違えて改良・開発を進める状況が存在した点にも注目する。さらに、上記の点を総合的に考察して、複数の実験プログラム間の相互交流が、当該実験の精度の高度化、測定範囲の広範化をもたらす原動力となり、「エネルギー量子」導出の重要な研究基盤だったことを述べる。

本研究は、先行研究の諸成果を活用して、熱輻射実験における個別の研究内容に触れながらも、個々の研究間の相対比較・相互連関への考察を行い、熱輻射実験の全体像を描くことを試みる。さらに、実験研究における複数のタイプの研究関与者の存在とその相互交流を鍵にして、熱輻射実験の全体像を示し、従来認識されていなかった革命的概念の誕生と実験活動の連関を明らかにしようとするものである。

第1章 19 世紀末の熱輻射実験の前史と Langley の研究の登場

19 世紀を通して、光のスペクトルと輻射熱に関する研究が発展し、太陽からの輻射線、日常的な物質からの輻射線などを包括するスペクトル研究が展開されていた。1880 年代のアメリカの Samuel P. Langley (1834-1906) の太陽光に関する研究が、データの比較対象として、人工輻射源の光のエネルギー分布研究に関わっていたように、当時の太陽光研究は、地上の実験室で実施できる分光学研究や熱輻射研究と分野的に重なっていた。イギリスの W. Abney (1843-1920) と General E. R. Festig は 1883 年論文「輻射、エネルギー、温度の関係について」の冒頭で、「太陽の輻射の大気の吸収に関する諸研究から、黒体からの輻射と温度の関係を確かめることが附随的に魅力あるものとなってきた」と記し²¹、太陽光研究からカーボン・フィラメントの白熱ランプ研究への連続性を綴っていた²²。1880 年代後半のドイツにおける W. A. Michelson (1860-1927) と H. F. Weber (1843-1912) の研究も、互いにアプローチは異なるものの、太陽光および固体スペクトルについて行われ、広範に一般化できるエネルギー分布式の導出が試みられていた。

²¹ 小林武信「熱輻射の温度と波長の理論としての W. Wien の熱輻射論」『19 世紀物理学史研究—その課題と方法—』No.3 (1988 年 3 月), 24-36 頁。引用文は 35 頁。Willam de Wiveleslie Abney (1843-1920) は、イギリス軍事技術学校で写真学を専門としていた科学者である。General E. R. Festig は、Abney の軍事職務の上司である。Cf. John C. D. Brand, *Lines of Light - The Sources of Dispersive Spectroscopy, 1800-1930* (Luxembourg: Gordon and Breach Science Publishers, 1995), 96.

²² Cf. Abney and Festig, *An Investigation into the Relations between Radiation, Energy, and Temperature, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Ser. 5, 16(1883): 224-233. 該当箇所は 224-225.

1880年代までの光および熱線に関する研究は、放射線を熱電気的および光学的に検出する手段、放射線の放射と吸収への考察、気体および固体のスペクトルに関する研究、光をより精確に分光する方法、熱放射のエネルギー分布法則への探究などを生み出した。そして、1880年代においては、当時の熱放射線の測定方法の成果を十分に活用し、ボロメーターという新しいタイプの熱放射測定器と、プリズムと回折格子の両者を使用する分光系を融合した Langley の機器構成が登場した。それは、放射源からの放射を回折格子で分光し、各スペクトル波長をプリズムで測り、当該のスペクトル強度をボロメーターで測定するという機器構成だった。Langley らの研究は、1890年代に入って本格化するエネルギー分布式導出の実験研究に対して、研究の方向性、実験データ、実験機器、機器構成等に関する重要な材料を提供することになった。

また、19世紀末ドイツでは、分光学・天文学とは異なる電磁波の関連実験が Hermann von Helmholtz (1821-1894) の学派の下で盛んに行われ、放射線を電磁波としてとらえる実験技術も高まっていた。さらに、電気系学科や PTR の設立に象徴されるように、産業に関連する実験研究を支える体制が整いつつあったドイツでは、熱放射を含む実験活動が飛躍していた。19世紀末の熱放射の実験研究は、熱放射理論の研究と同様、19世紀を通して考察・分析・研究された諸成果を活用し、当時の社会的背景と交わりながら活発化していた。

第2章 1880年代末-1890年代初頭：熱放射のエネルギー分布測定に向けた新たな機器構成の登場－集約点としての Paschen の熱放射実験－

1890年代における熱放射の実験研究では、ドイツの研究活動が中心となった。その中心は、ハノーファーの Friedrich Paschen (1865-1947)、ベルリンの Otto Lummer (1860-1925)、Heinrich Rubens (1865-1922) であった。他にもドイツではなくアメリカの E. F. Reid, C. E. Mendenhall, F. A. Sauders といった科学者が熱放射実験に携わったが、熱放射のエネルギー分布を高精度・広範囲に測定できたのはドイツの三者を中心とする各研究グループだった。

Paschen は弟子の H. Wanner と共同研究を行うこともあったが、ほとんどの場合、単独で研究を行い、ハノーファーにおける熱放射実験の中心人物だった。Lummer は、Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) や Ernst Pringsheim (1859-1917) らと共同して熱放射関連の研究に取り組み、ベルリンの PTR を主な活動の場とする研究の中心にいた。Rubens は、B. W. Snow (1860-1928)、E. F. Nichols (1869-1924)、A. Trowbridge (1870-1934)、E. Aschkinass (1873-1909) ら数多くのアメリカ人・ドイツ人研究者たちとの共同研究を経て、Kurlbaum とともに残留線の熱放射実験を行い、ベルリンの大学施設を主な活動の場とする研究の中心人物だった。Paschen, Lummer, Rubens は、異なる場所・環境で共同研究者と熱放射関連研究を進めて、特徴的な研究内容・測定結果を提供した。

1880年代末-1900年における Paschen, Lummer, Rubens らの三者の実験研究には、1880年代末-1890年代初頭（始動期）、1890年代中頃（準備期）、1890年代後半-1900年（確立期）の各時期に異なる段階が見られた。

1880 年代末-1890 年代初頭においては、三者の研究目的は、熱輻射のエネルギー分布曲線を精確に得ること (Paschen)、視感の困難な波長領域もカバーできる光度計の開発 (Lummer)、Heinrich Hertz (1857-1894) の電磁波実験と同様な実験を電波ではなく赤外部波長で実施してその是非を問うこと (Rubens) と異なっていた。だが、いずれの研究も熱輻射現象を扱い、輻射の波長スペクトルを課題の一部としていた。そのため、目的は合致しないが、輻射測定器としてのボロメーター、ボロメーター内蔵のガルヴァノメーターという使用器機の開発・研究を通して、交流する部分をもっていた。機器構成についても、熱輻射のエネルギー分布を測定していた Paschen と、赤外部輻射線を扱っていた Rubens が、1880 年代の研究の諸成果を導入し、独立に「輻射源-プリズム-ボロメーター」という共通する構成をつくり上げていた。とくに、明確にエネルギー分布測定を目的とする Paschen の機器構成は、1890 年代のドイツでの本格的な熱輻射実験の始動にとって要となった。

第3章 1890 年代中葉：熱輻射分布測定のための基礎研究の拡充—分散式の確立—

1890 年代中頃における三者の研究目的も、1890 年代初頭からの延長線上にあったことから合致してはいなかった。だが、蛍石プリズムの分散における測定誤差の究明 (Paschen)、長波長に有効な分散式の導出と検証 (Rubens) などの細かな課題を通して、三者間に重なり合う点が見られた。1890 年代前半に Paschen が取り組んだ、二酸化炭素のスペクトル吸収の問題は、空洞内に存在する気体のスペクトル吸収の研究であり、その研究は、Lummer と Wilhelm Wien (1864-1928) が試み始めようとしていた空洞輻射源の研究のヒントにもなり得た。1890 年代中頃は、プリズムや空洞輻射源の取り扱いを通して、三者の研究の共通する課題もしくはその課題が部分的に関連し合い、1890 年代末に展開され始める高精度な熱輻射測定の準備が徐々に進んだ時期だった。

第4章 1890 年代後半-1900 年：

熱輻射エネルギー分布法則の導出・検証における実験研究の相互交流

1890 年代後半-1900 年の三者の実験では、熱輻射エネルギー分布法則の導出・検証が研究対象として現れ始めた。1890 年代前半からエネルギー分布を研究対象としていた Paschen は、自身が実験的に導出した分布式と Wien が理論的に導出した式が合致したことを受けて、いち早く Wien 分布法則の肯定的検証を目的とした。Lummer らは、電気加熱式の円筒形空洞輻射源の機能を確認するために、Stefan-Boltzmann 法則、Wien 変位則、Wien 分布法則などの一連の輻射関連法則を順々に調べた。1890 年代末になると、Rubens が新しく発見した残留線を利用して、遠赤外線のリズムを調べる意味で輻射法則検証に携わるようになっていた。これら三者の研究は、輻射法則の検証においてうまく相補し合い、広い測定範囲にわたるエネルギー分布のデータを提供したのである。1900 年の Planck 法則の提出前後には、このような実験研究の展開があった。

三者の実験研究は、1880年代末-1890年代初頭の始動期において、その目的を違えていたが、放射測定器の開発・研究を通して交流する部分をもっていた。1890年代中頃の準備期になると、分光系の機能に関わる分散式の導出や、空洞放射の研究をめぐって関連し合い、三者間の交流する度合いが強まっていた。1890年代後半-1900年の確立期には、各目的にとって熱放射のエネルギー分布測定が有効な手だてとなり、三者の研究が分布法則の検証に関与するようになっていた。この展開から見えてくる点は、三者の研究が目的を通して徐々に近づく現象に加えて、それを引きおこしている作用因に放射測定器、分光系、放射源といった実験機器が深く関わっていることである。これは、研究に携わる科学者の意図から離れて、実験機器を介したつながりが、三方向の異なる研究間の距離を縮め、一つの方角に関連づけられるという過程である。熱放射実験の発展過程には、実験活動ならではなかった展開があった。

第5章 熱放射実験における目的・機器・機器構成の動向と 実験プログラムの相互交流

1890年代後半-1900年の確立期に、三者の研究は放射法則の導出・検証を目指すようになっていた。だが、それまでの目的と経緯の違いから、彼らの取り組む実験プログラムは異なっていた。

Paschenの実験プログラムは、彼の信頼する Wien 分布式の導出・検証に向けて、それまで採用してきた「放射源-プリズム-ボロメーター」という機器構成のさらなる安定化・高精度化を目指し、同構成の細部に改良を施すものだった。とりわけ、1890年代前半を通して十分に研究されてこなかった放射源を集中的に研究した。当初の Paschen の放射源研究は、空洞放射源が実用化される前段階から始まっていたことから、それまで一般的だった加熱白金などの固体放射源を採用し、様々な種類の固体を試みるものだった。1897年を過ぎて、空洞放射源の実効性におおよそめどがつくと、Paschen も固体ではなく空洞型を視野に入れ、空洞の中心に固体放射源を設置する固体-空洞折衷型、その後、1899年に空洞型放射源を採用した。つまり、Paschen は、1890年代初頭から熱放射のエネルギー分布測定を実施していたことから、1890年代前半時点の先端的な実験機器・機器構成を採用することになった。それは、「固体放射源-蛍石プリズム-ボロメーター」という構成だった。この組み合わせは、1890年代末まで基本的に継承され、10 μm 以下の波長範囲の確実な測定データを繰り返し示すのに有効だったが、新たな測定範囲のデータ提供、データへの新しい見方を創出することには不向きであった。また、彼の測定データのグラフ表示の仕方は、x 軸、y 軸に波長と放射エネルギーの対数をとるもので、測定誤差をできるだけ抑えて、放射エネルギーと波長の関係をより鮮明に浮き上がらせる性質のものだった。このような傾向は、熱放射実験に対する Paschen の姿勢を表していた。彼は、法則性を見出すことを追求し、1896年時点で有望視された Wien 分布式 (Wien 法則) の肯定的検証にこだわり、Wien 式からずれる実験結果を誤差とみなしがらだった。これは、彼の上司の Heinrich Kayser (1853-1940) と Carl Runge (1856-1927)

が取り組んでいた、可視分光現象から普遍的なスペクトル式（法則性）を導く研究の傾向を強く継承したものと見える。Paschen の採用した実験プログラムには、彼が熱輻射研究に求めたものが表現されていた。

Lummer は熱輻射分布の測定結果を提出し始めるのは 1899 年以降と遅いが、理想的な光源・熱源に適う空洞輻射源の開発を目的とする実験プログラムをもっていた。1895 年に案出し 1897 年に実用化された空洞輻射源、1898 年以降は、円筒形空洞輻射源を研究課題の中心に据えながら、「輻射源－ボロメーター」という分光系を利用しない機器構成で、全輻射と輻射量の関係を調べた後、1899 年に入り、Lummer らは Paschen の研究を参考に熱輻射分布測定の結果を提出するに至った。Lummer らの分布測定を本格的に始めた時期は、Paschen の取り組み始めた時期に比べかなり遅く、すでに「固体輻射源－螢石プリズム－ボロメーター」ではなく他の機器構成の候補もあり得る時期になっていた。後になって分布測定を始めた Lummer は、Paschen のように Wien 式に特別な思い入れをもつこともなく、10 μm 超の波長範囲における Wien 式の測定データとのズレを明らかにする試みに躊躇はなかった。その Lummer らが 1900 年に採用した機器構成は、自身の開発した円筒形空洞輻射源に、長波長対応の Rubens のカリ岩塩プリズムを組み合わせた「空洞輻射源－カリ岩塩プリズム－ボロメーター」であった。標準研究と絡めて輻射源を開発していた Lummer には、測定データに忠実に対応することが第一だった。1900 年前後に Lummer が提唱した熱輻射分布式は、指数に小数の入ったもので、Planck 式と比べて数学的単純さに欠けていた。そうなったのも、自らの測定データにいかに近づけるかという Lummer の姿勢に起因していた。Lummer は標準研究に従事する者らしく、確実に見込みのある実験機器・機器構成を基本とし、そこから得られる実験結果に忠実であろうとした。Paschen と同様、Lummer が熱輻射研究に求めたものが、彼の実験プログラムに表現されていたのである。

Paschen, Lummer らに対して、Rubens は、遠赤外線の研究を通して Maxwell 理論の赤外部への適用を目指す独自の実験プログラムをもっていた。彼の独自性は、Paschen, Lummer らと全く異なる「輻射源－（残留線のための）反射物質－熱電対列」の機器構成を採用したことにも現れていた。Rubens も 1890 年代前半当初は Paschen らと同じ「輻射源－プリズム－ボロメーター」という構成を採用していたが、Paschen らと異なり、「輻射源－プリズム－ボロメーター」を基本にしながらも、「輻射源－干渉平行板－プリズム－ボロメーター」、「輻射源－回折格子－プリズム－ボロメーター」と数年間隔で機器構成に変更を加えていた。1890 年代後半に入ると、新しく発見された「残留線」を利用する分光系を機器構成に導入した。測定対象の波長が 20 μm を超えるなか、不適なプリズムは採用されず、1890 年代後半当初の機器構成は「輻射源－反射物質－ボロメーター」となり、さらに、「輻射源－反射物質－ラジオメーター」、「輻射源－回折格子－反射物質－ボロメーター」と機器構成を変えた。1900 年の Rubens は、50 μm を超える微弱な輻射線に応えるため、最終的に「輻射源－反射物質－熱電対列」を機器構成とするに至った。また、そのときの輻射源は、それまでのジルコンバーナーやアウアー灯ではなく、熱輻射分布測定に適した Lummer らの円筒形

空洞輻射源となっていた。Rubens は、金属の選択反射能測定に始まり、電波の偏波や反射の測定、赤外線分散・屈折・偏波の測定、各種プリズムの分散研究、残留線の研究を経るなかで、一貫して、赤外線に対する Maxwell 理論の適用を確かめる研究を進め、1890年代末には、より電波領域に近い遠赤外部の輻射線の検出と遠赤外線の輻射実験に成功した。この一連の実験のために、Rubens は見込みのある実験機器・機器構成を果敢に採用し、それらの機器・機器構成を研究していた。また、未知の波長範囲の測定を実現するために、既存とは異なる機器構成を躊躇せず採用した。その取り組む姿勢は終始変わらず、見込める道具立てではできる限り利用した。このような Rubens の実験プログラムの傾向は、ドイツ人・アメリカ人研究者との多彩で積極的な彼の共同研究と相通じるものがある。1900年までを見る限り、Rubens の変更された機器構成のすべてが良好だったわけではないが、長波長に向けて新規の道具立てを導入し続ける姿勢は、残留線発見を生み、長波長向け輻射計の開発につながった。このような実験プログラムをとった Rubens だからこそ、1899年に取り組み始めた熱輻射分布測定に即応し、Lummer らと同型の空洞輻射源を使いこなし、理論家 Planck とうまく協調できたのであろう。上述と同様、Rubens の求め続けたものが、彼の採用した実験プログラムに表現されていたのである。

1880年代末-1900年の熱輻射実験の研究には、Paschen, Lummer, Rubens を中心にした実験プログラムがあり、そのプログラム間には、可視・赤外分光測定、標準研究、遠赤外線測定などに関わる、彼らの研究経緯や実験目的に基づく違いが存在していた。その違いは、輻射測定器、分光系、輻射源の選択・開発や、それらの組み合わせである機器構成にも表れていた。そして、1900年に近づくにしたがって、相異なる意図・目的の三方向の研究は、扱われる実験機器・機器構成を通して、熱輻射分布測定という一つの方向へ向かった。だが、三者の研究は一つに融合するのではなく、あくまで、実験の目的、実験機器の選択や機器構成の採用に関わる実験プログラムの相違によって、異なる視点で分布測定に向かっていた。その現れとして、異なる波長・温度の測定範囲のエネルギー分布のデータ提出が行われ、それが結果的に相補的な関係を築くことにもつながった。融合しなかった三者の研究は、20世紀に入り、可視分光測定、標準研究、赤外線測定という各々の道に向けて再び展開していた。つまり、19世紀末の熱輻射実験の展開は、異なる実験プログラムをもつ研究が融合までには至らないが重なり合い、特定の目的に対して相補い合っていく道程であり、実験機器や機器構成というモノの扱いを通して先導された実験プログラムの相互交流の展開であった。

第6章 実験研究の展開における Planck 熱輻射論

19世紀末の熱輻射実験の展開は、Max Planck (1858-1947)の熱輻射論と彼の研究方法に対しても大きな意味をもっていた。Planck の理論的方法は、輻射場と共鳴子の存在を仮定して、共鳴子と輻射線のエントロピーを表す式を、熱輻射のエネルギー分布の測定結果を反映するよう帰納的に求め、理論的断絶にもか

かわらずそのエントロピー式を熱輻射理論の中に導入し、その後は演繹的に Wien 分布式を導くというものだった。この方法を通して、Planck の熱輻射論は、1900 年前後の他の理論と比べ実験結果によりよく対応する理論となった。科学研究に当然とみられがちな理論-実験、演繹-帰納の協調は、当時の理論研究で必ずしも重視されていたわけではなく、Planck の方法の特徴となっていた。Planck はこのような理論的方法をとったため、熱輻射論を形成するうえで、信頼できる実験的基盤を必要とした。当初の彼の熱輻射論は、Wien 分布式を実験的基盤として、その分布式をエントロピー式の逆算元にして形成されていた。1890 年代後半を通して Wien 式を実験的に確証したと考えられた Paschen の実験研究は、最初の Planck 熱輻射論とその方法の展開を支えていた。そして、1900 年に Planck 分布式を導出した新しい彼の理論は、Rubens らの実験結果を基盤として展開され構築された。遠赤外部の輻射線の実験に特化した Rubens の研究は、それまで未知だった種類の輻射データを与え、新しい Planck 熱輻射論の形成を支えた。世紀転換期の熱輻射理論を代表する Planck の理論研究は、彼の研究方法を介して、複数の実験プログラムをもつ実験研究と結びつくことで成り立っていた。

終章 結論

本研究における、複数の実験プログラムが交わる実験研究の動向と、その動向に対応できる方法をとった Planck の熱輻射論の展開への分析は、19 世紀末ドイツを中心とする熱輻射実験の動向の全体像を提示し、Planck の研究方法を具体化することに成功した。そして、この論考によって、19 世紀末ドイツでなぜ熱輻射研究が興隆したかという問いに一つの答えを与えることができる。それは、産業界からの影響を重く見る、天野清、D. Cahan らの見解、純粋科学の伝統を主な要因と見る H. Kangro の見解に加えて、当時の実験プログラムを鍵にした相互交流や相補的關係が生まれた実験的展開に基づく回答である。19 世紀末ドイツを中心に展開され、複数の実験プログラムを交えた熱輻射実験の研究は、広範で高精度の実験データを提供しただけでなく、Planck 熱輻射論の形成の基盤の一部となり、理論研究の新たな展開も生み出したのである。

このことを踏まえると、なぜドイツで革命的な「エネルギー量子」概念が生まれ得たかという問いに対する新たな答えも視野に入ってくる。世紀転換期ドイツの熱輻射実験の研究は、実験研究者ないし研究グループがもつ独自の実験目的、実験プログラムに基づいて進められ、幾つかの種類の実験データおよびデータに対する異なる解釈を提供していた。ベルリンの Planck はこれらの実験研究の動向にただ居合わせたのではなく、それらの実験結果を取り込む理論的方法を備え、実験研究の動向に対応して新たな理論構築に着手していた。この結果、Planck 熱輻射論は、継ぎ接ぎ的ながらも、当時の理論が抱えていた古典的要素と、実験の中に隠されていた非古典的要素の両者を取り込み、彼の理論から新しい科学概念、エネルギー量子が生まれたのである。このような実験研究の動向と特異な理論的方法の展開が交流する空間がドイツにあったのである。

Interaction of Experimental Programs:

A Study of the Development of Experimental Research on Heat Radiation in Germany at the End of the 19th Century

KONAGAYA, Daisuke

This dissertation analyses the development of experimental research on heat radiation in Germany at the end of the 19th century from the viewpoint of 'experimental programs'. The concept of 'experimental program' indicates a set of experimentations. Experimentalists aim their research at some direction, and according to that direction, they select and develop some instruments, then make a kind of instrumental configuration for the intended experiment. If any problems appear, they adjust their instruments and instrumental configurations or try other instruments to measure and experiment. This continues until they achieve the aim of their experiments.

There were three main experimental programs in the radiation research in the 1890s. The first experimental program was led by Friedrich Paschen (1865-1947) in Hannover, searching for the energy distribution law through his spectroscopic radiation measurements. The second experimental program was led by Otto Lummer (1860-1925) and his collaborators in Berlin, improving the standards of light or heat on the service of the PTR. The third experimental program was led by Heinrich Rubens (1865-1922) and his collaborators in Berlin, making an examination of Maxwell electromagnetic theory in the range of infrared wavelengths.

These three experimental programs interacted through the intersection of the aims of programs, the development of instruments and the investigation into the instrumental configurations in the research on heat radiation at the end of the 19th century. The interaction between spectroscopic, standard-oriented and electromagnetic experimental programs provided the radiation experiments with the different precision instruments, the various configurations of instruments and the measurements on spectral radiation covering a wide range of wavelengths and temperatures.

In addition, the development of radiation experiments interacted with Max Planck's theoretical research at that time, because his theoretical method had both inductive and deductive aspects on the basis of his introduction of the formula of electromagnetic entropy corresponding to the latest experimental results. This experimental and theoretical interaction prepared a research frame for Planck's derivation of a new distribution formula and his introduction of energy quanta in 1900.

清末中国の近代的科学技術導入における清官僚の明治日本視察の役割

梶研究室 盛葉蘭

本論文は、清末中国の近代的科学技術導入における清官僚の明治日本視察の役割を明らかにしたものである。

はじめに

まず、テーマの背景および意義、先行研究、研究の対象と方法について説明した。

清仏戦争（1883-85）と日清戦争（1894-95）の敗北を経て、清政府もようやく改革の必要性を感じ、清末の政治改革である「戊戌（ぼじゅつ）変法」（1898）や「新政」（1901-08）が行われた。19 世紀後半から 20 世紀初頭は中国が積極的に外国から学ぼうとした時代で、その中でも、とくに清末の最後の十年余りは、中国は日本との交流が盛んであった。

その交流は、主として 1) 留学生、2) 日本人教習や顧問、技術専門家、3) 視察官僚の三者によって担われた。このうち留学生については、すでに多数の研究結果が出されている。しかし日本人教習や顧問、技術専門家などに関する研究は、まだ多くない。さらに、視察官僚に関する研究も少ない。

日本視察官僚の研究にとって、最も重要な手がかりとなる史料は『東遊日記』である。歴史学者佐藤三郎によると、『東遊日記』は「東の方向に進んで旅をしているとのことを記した日記」で、「東の方向」は日本を指す。つまり、「日本国内を旅行したときの日記」である。留学生だけではなく、中国の中央・地方の諸官庁、学校、実業機関などからの視察者によって『東遊日記』が次々と生み出された。

中国における日本研究は、通説¹によれば、次の五段階に分けられる。第一段階は明朝期前であり、第二段階は明朝期（1368-1644）であり、第三段階は清朝初期（17-18 世紀）であるが、第四段階は明治期前半（1868-1894）である。第五段階は日清戦争のあった 1894 年以降である。筆者は、このうち第五段階に属する 1894 年-1911 年に発行された中国官僚が書いた『東遊日記』を 60 冊余収集して分析した。この 60 冊余の『東遊日記』は、主に 1) 清華大学図書館古籍室、2) 都立中央図書館実藤文庫の二カ所で収集し、さらに近年新たに復刻出版されたものを加えたものである。本研究では、以上のように収集した『東遊日記』の内容分析を行い、中国近代教育史、経済史に関する先行の諸研究や、刊行されている伝記をも利用しながら、清末中国の近代的科学技術導入における清官僚の明治日本視察の役割を明らかにした。

¹ 呂順長編 『晚清中国人日本考察記集成・教育考察記』杭州大学出版社、1999 年、総序、i。

第一章

洋務運動は失敗に終わったが、明治維新は成功した。それゆえ、当時の日本は中国人にとって、警戒すべき国ではあったが、同時に魅力的な国であり、日本に学ぼうと主張する人々が現れた。日本側も西洋諸国に対抗する必要から中国に対して、積極的に日本視察を働きかけた。こうした政治背景のもとに、清の中央政府と地方政府は、官僚を日本に派遣した。

第二章

入手して分析した『東遊日記』の一覧表を作り、各種のデータ分析を行い、派遣者、視察者及び視察内容などの特徴を分析した。入手した『東遊日記』を書いた官僚による視察のピークは、1903年と1906年前後に見られる。1903年が多いのは、大阪博覧会が行われ、その参加のために招待されて多くの中国人が来日したためである。1906年前後のピークは1904年に「奏定奨励官紳遊歴章程」（官紳遊歴の奨励を奏上する章程）が公布されたのに加え、教育視察者の増加と清政府内の立憲運動の高揚とに深くかかわっている。

1901年以降教育視察者が多くなり、ほかの分野の視察者を上回った。教育視察も視察の全体の傾向と一致し、1903年と1906年に二つのピークがある。

初期の視察において、教育視察に続いて多かったのは軍事視察である。その理由として、やはり洋式兵器の導入から始まった洋務運動とのつながりや、外国、特に日本の強さが軍事にあると考えたことによると思われる。しかし、視察が重ねられるうちに、軍事だけでは国を強くすることができないことが理解され、日本の進んだところが軍事だけにあるのではないと考えられるようになった。さらに、1906年までは視察者は軍事学校などの軍事施設も自由に見学できたが、その後は、特別な許可がなければ見学ができなくなったため、以降、軍事視察は減少した。

軍事と比べると、初期には少なかった政治視察をはじめとするその他の各種の視察が後期には頻繁になり、政治、法律・裁判、地方自治、農業、工業、商業などさまざまな内容が視察の対象となった。

実業視察の数の推移も政治視察と同様に、後になるほど多くなっている。1903年に多かったのはやはり大阪博覧会のせいであろう。

第三章

第三章では、主に具体的な科学技術に関する視察内容について考察した。第一節は日本政府の科学技術に対する制度を考察した。制度としては、教育制度と実業制度がある。

日本の教育制度に関する視察の内容の中から、教育宗旨（教育勅語）、文部省、学制の三つの点を取り出して考察した。教育宗旨に関して、視察者はその内容だけではなく、日本の教育宗旨発展の歴史についても書き記している。また、その内容を分析すれば、清末教育変革において最初に提起された教育宗旨が如何に日本の教育勅語に倣って作られたのかがわかる。文部省について、組織だけではな

く、各部局の具体的な機能および関連施設についても『東遊日記』では詳しく述べられている。また、当時、文部省により、日本では全国の教育行政システムも作られたが、これは当時、文部省に相当する「学部」と全国の教育行政システムを作ろうとしていた中国人にとって、大きな示唆を与えた。呉汝綸(1840-1903)をはじめとする一部の官僚が日本の学制に関心を示した。具体的には第四章で説明した。

日本の実業制度に関する視察の内容の中から、農商務省、通信省、大蔵省に関する記述を取り出して分析した。『東遊日記』の中で視察者たちは、農商務省、通信省、大蔵省の組織を説明したが、農商務省関係では商品陳列館について多くの記述がなされている。また、農商務省の付施設も詳しく書き残されている。通信省について、その下の郵便局、電話局などがとくに視察者によって注目された。大蔵省に関しては、主に大蔵省に属す印刷局、造幣局及び勸業銀行が視察者に注目され、多く『東遊日記』に記述されており、税金制度も考察され論じられた。農商務省と中国の農工商部、通信省と中国の郵伝部のつながりについては、後の第四章で論じた。

第二節は、教育に関する視察である。教育に関しての視察者は最も多く、明治日本の教育のさまざまな面について『東遊日記』で記述されている。また、視察された学校は多かったが、だいたい視察の対象となった学校は共通していた。学校の施設、管理法など以外に、科学技術関係の授業科目、とくに、東京帝国大学の科学技術教育が視察者の関心を呼んだ。実業教育も重視され、東京高等工業学校について多く視察され記述された。また、教育視察者は実験教育にも注目し、学校の実験室や実験場についても書き記した。

第三節は、実業に関する視察である。視察者らは日本を視察したときに、日本の実業に対する深い関心を示した。それは、実業の重要さを視察者が認識するようになったほか、日本の実業の実力を視察で実感したからである。視察者らは実業を視察するときに、主に製造業に注目した。銀元局総弁周学熙(1866-1947)によれば、日本の製造業には全ての製造業がそろっていたことと工場の規模がかなり大きかったことという二つの特徴があった。また、日記の中で、単に科学技術的な内容の説明だけでなく、工業についての考え方も論じられている。また、農業や工業の試験場も視察された。最後に、実業振興の措置である大阪博覧会と「勸工場」や「商品陳列所」が多くの視察者に視察され、高い評価を得た。

第四章

第四章では、主に視察官僚の帰国後の貢献について考察した。まず制度に対する貢献を取り上げた。清末の教育に対する改革の中で、もっとも大きな成果は、1902年に公布された最初の近代的学制「欽定学堂章程」と1904年に公布された近代的学制「奏定学堂章程」であった。呉汝綸が日本で視察する間に、「欽定学堂章程」制定準備は、管学大臣張百熙(1847-1907)を中心にして進められ、呉汝綸はその制定には直接には参与しなかったが、呉汝綸滞日中にも、張百熙に視察事情の中間報告として7回にわたって意見書を出しており、また、制定に関与

した道官張小浦にも数回手紙を出した。湖広総督張之洞(1837-1909)は教育改革や教育振興、日本視察を重視し、たくさんの官僚を日本へ視察に派遣した。1903年6月、張之洞は朝廷に命じられて、日本の学制と「欽定学堂章程」に基づいて、さらに自分の意見を加え、「奏定学堂章程」を作成した。「奏定学堂章程」は、戦前の日本の学制とよく似ており、さらに現在の学制とも似ている。

農工商部や郵伝部も視察者あるいは視察者の提言により、日本の農商務省と通信省に倣って設立された。

第二節は教育に対する貢献を扱った。多くの視察者が新式学校の設立と改革に関心を持ち、帰国後、自ら学校の設立あるいは運営に参加し、直接に教育事業の発展を促進させた。また、視察者が日本を視察したときに、日本の新式教育の発展を称え、帰国後、彼らは上司や他の官僚に対し、新式教育を勧める提言をした。そして、これらの部下を派遣した袁世凱(1859-1916)や張之洞などの地方の中心的官僚は、もともと教育改革に関心を持ち、部下の提言による日本での視察成果を生かして教育改革を進めた。また、視察者は多くの新式学校とともに多くの教育関連施設も創設し、関連事業を行った。例として、1904年に設立された湖南図書館が挙げられる。

第三節は実業に対する貢献である。まず、地方からは多くの人材が日本へ実業視察のために派遣され、帰国後、地方の実業の発展に取り組んだ。とくに注目されるべきなのは、袁世凱と張之洞の事業であった。また、中国近代工業発展史上では有名な実業家「南張北周」(張謇(1853-1926)と周学熙(1865-1947)をさす)も日本視察を行い、『東遊日記』を残した。これらの人々はただ多くの実業会社を設立したのではなく、多くの実業関連施設を設立し、実業関連の考え方、とくに実業重視の考え方を『東遊日記』と実行を通じて皆に伝えた。最後に、一つの実業振興の事例として、南洋大臣端方(1861-1911)と南洋勸業会を取り上げた。

第四節は科学技術知識の普及に対する貢献を考察した。とくに数学者周達(1878-1942)を取り上げた。普及手段としては、『東遊日記』、実物、翻訳などがあったことを指摘した。

終わりに

以上のように、結論としては、日本視察官僚は、当時の中国の近代的科学技術導入に大きく貢献した。ところが、清朝が滅亡したため、清官僚と新政時期の改革は、失敗した改革として長らく低く評価されていた。しかしながらその限界性よりは、彼らによって当時新事業が出現したことの進歩性こそ高く評価されるべきであろう。それゆえ、日本視察官僚による教育上、実業上の貢献を評価すべきであり、とくに近代的科学技術導入における清末官僚の明治日本視察は、大きな役割を果たしたといえよう。

今後、『東遊日記』について、一層の収集や分析を行う必要がある。また、さらに多くの視察官僚に関する資料収集を行い、清末官僚の全体的かつ歴史的な貢献を明らかにしていく必要がある。

The Role of Qing Dynasty Bureaucrats in the Introduction of Modern Science and Technology to China in the End of 19th and Early 20th Century

Sheng Ye Lan

This thesis has analyzed the role of the visit to Japan of Qing Dynasty bureaucrats in the introduction of modern science and technology in the end of 19th and early 20th centuries (1887-1911). For that purpose about sixty sets of so-called “Dong You Diary”, reports on their visit, and some of their biographies have been collected and thoroughly examined .

After previous research on the theme has been briefly summarized in the introduction, the background of Qing Dynasty bureaucrats’ visit has been explained in Chapter 1. The reason of the change of Qing government’s policy from sending students abroad to sending bureaucrats also has been discussed.

In Chapter 2 all the collected diaries have been listed with names of bureaucrats and agencies or local governments which had sent the bureaucrats and purposes of their visits. All these data have been classified and summarized.

In Chapter 3 parts from diaries concerning education and industry of Japan have been examined carefully. As a result it has been shown that the bureaucrats paid special attention to the development of science and technology in Japan as well as educational and industrial system.

In Chapter 4 analysis of some of well-known bureaucrats’ achievements in China after their visit has confirmed their important role in 1) establishment and development of first modern educational system of China, 2) foundation of the Ministry of Agriculture and Commerce and the Ministry of Posts, 3) promotion of industry and 4) popularization of knowledge on science and technology.

In conclusions the thesis has discussed contribution of the bureaucrats’ visit to Japan in the late Qing Dynasty to introduction of modern science and technology into China. This research has shown Qing bureaucrats’ role in the introduction of science and technology in addition to the role for the establishment of modern educational system which had been shown by prior research. This research also shown the role of bureaucrats’ visit for the promotion of modern industry and enterprise and development of business elites in China. This research should shed a new light to reform in the late Qing Dynasty which has not been properly appreciated because of the collapse of the Dynasty.

投稿規定

1. 本学で研究・教育に携わる者は投稿することができる。その他、編集委員会が必要あるいは適切と判断した場合も本誌に投稿することができる。
2. 投稿の種類は、論文、寄書・資料紹介、研究ノート、修士・博士論文概要等とする。
3. 原稿の掲載の可否は審査を経て決定するものとする。論文審査は、編集委員もしくは、編集委員会が必要と判断した場合は、別に適切な審査員を選んで行う。
4. 原稿の分量は注や図表も含めて40,000字を一応の限度とする。
5. 原稿は3部提出し、著者は手元にオリジナルを必ず保管する。また、原稿の電子ファイルを収めた電子媒体(フロッピー・ディスク、CD-ROM等)を提出する。投稿した原稿・電子媒体は返却しない。
6. 原稿は下記宛に送付する。
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学大学院 社会理工学研究科
経営工学専攻 技術構造分析講座 大岡山西 9号館『技術文化論叢』編集委員会
7. 掲載された文書の著者には掲載号を3部贈呈する。
8. 発行後に訂正を要する事項が生じた場合には、できるだけ早く文書で編集委員会に申し出る。
9. 本誌に掲載された文書の著作権は『技術文化論叢』編集委員会に帰属する。他に転載しようとする場合には、あらかじめ編集委員会に申し出て許可を受けなければならない。
10. 本誌に掲載された文書は、一定期間を経た後、技術構造分析講座のホーム・ページにおいて公開される。URL：<http://www.histec.me.titech.ac.jp/course/index.html>
11. 原稿の作成は次のようにおこなう。
 - (1) 原稿は、原則としてワード・プロセッサを用いて作成する。使用するソフト・ウェアは、一般に広く普及しているものが望ましい。
 - (2) 用紙はA4サイズのを横書きで使用し、1ページあたり35字×40行を目安とする。左右3cm、上下3.5cmの余白をあける。
 - (3) 原稿の冒頭に和文表題・著者名を入れる。また、著者の所属機関名など連絡先を脚注に記す。
 - (4) 英文表題とローマ字による著者名を付記する。
 - (5) 論文には250語以内の欧文要旨をつけることが望ましい。
 - (6) 句点はコンマ(,)、終止点はピリオド(.)を用いる。
 - (7) 文中の引用文は「」の中に入れる。長い引用文は本文より2字下げて記入する。
 - (8) 図表には表題をつけ挿入個所を指定する。説明文は挿入個所に書き入れる。図表は白黒のみとし、そのまま写真製版できるような鮮明なものを使用する。カラーの図表は受けつけない。
 - (9) 引用文献の記載においては、出典を確認できるよう十分な書誌データを記す。書き方は以下の例に準じる。

<書籍>

- ・ロバート・オッペンハイマー(美作太郎、矢島敬二訳)『原子力は誰のものか』中公文庫、中央公論新社、2002年、17頁。
- ・Mark Walker, *Nazi Science: Myth, Truth, and the German Atomic Bomb* (Cambridge: Perseus Publishing, 1995), 269-271.

<論文>

- ・David Holloway, "Physics, The State, and Civil Society in the Soviet Union," *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 30(1999): 173-192.
- ・スタンリー・ゴールドバーグ(春名幹男訳)「グローブス將軍と原爆投下」『世界』岩波書店、611号(1995年8月)、173-191頁。

この投稿規定は2005年4月1日以降から適用する。

『技術文化論叢』編集要綱

1. 発行趣旨

今日の科学・技術の発展はきわめて急速であり、社会における科学・技術のあり方や先端技術の方向性如何が環境問題や人間性にかかわるものとして論議をよんでいる。他方、技術開発をめぐる国際的競争はますます激化しており、ここでも先進国間、南北間での技術移転や国際協力問題は国際的な課題となっている。東京工業大学大学院社会理工学研究科は「科学技術と人間社会のインターフェイスに位置する文化や科学技術を対象とする学問領域を切り開くために」設置された。

『技術文化論叢』は、こうした状況の下で、科学や技術の本質、それらの発展の仕方や社会的関係などを歴史的に、哲学的・方法論的、あるいはひろく社会科学的に論議する研究誌として公開するものである。

2. 発行主体

東京工業大学大学院社会理工学研究科経営工学専攻技術構造分析講座で発行の運営を行う。

3. 編集組織

上記技術構造分析講座を中心として編集委員会を構成するが、適宜必要に応じて東京工業大学内の構成員が加わることも妨げない。編集委員は、1年任期とする。再任を妨げない。

4. 発行回数

原則として年1回とする。

5. 投稿資格

本学で研究・教育に携わる者とするが、編集委員会が必要あるいは適切と判断した場合は、この限りではない。

6. 審査

投稿論文の掲載の可否は審査を経て決定するものとする。論文審査は、編集委員もしくは、編集委員会が必要と判断した場合は、別に適切な審査員を選んで行う。

7. 掲載投稿の種類

論文、寄書・資料紹介、研究ノート、修士・博士論文概要等とする。

8. 次号(第13号)の原稿提出締め切りは、2010年1月8日とする。

『技術文化論叢』第12号(2009年)

2009年4月1日発行

編集：技術文化論叢編集委員会

編集委員長：山崎正勝

編集委員：野澤聡、栗原岳史、和田正法、古谷紳太郎、大森仁

発行：東京工業大学大学院 社会理工学研究科 経営工学専攻
技術構造分析講座

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1

URL：<http://www.histech.me.titech.ac.jp>

Tel: 03-5734-3610 / Fax: 03-5734-2844

印刷：国際文献印刷社

Contents

<Articles>

Fermi's Legacy: The Disappearance of Fermi's Concept of Neutron Slowing-down by Protons from Current Reactor Physics Textbooks
FUKAI, Yuzo..... 1

The Organizations for Research and Development on Radiological Warfare after the Second World War in the United States: 1945-1948
KURIHARA, Takeshi..... 31

<Research Note >

US Army Destroyed Japanese Cyclotrons: US Official Record Shows Two in the Imperial University of Osaka, What was the Second
FUKUI, Shuji 59

<Short Summaries of The New Dissertations>

A Study on the Development of Japanese Power Systems Engineering
ARAKAWA, Fumio 81

Interaction of Experimental Programs: A Study of the Development of Experimental Research on Heat Radiation in Germany at the End of the 19th Century
KONAGAYA, Daisuke..... 101

The Role of Qing Dynasty Bureaucrats in the Introduction of Modern Science and Technology to China in the End of 19th and Early 20th Century
SHENG, Ye Lan..... 115

TI Tech Studies in Science, Technology and Culture

No. 12 (2009)

Tokyo Institute of Technology