

技術文化論叢

No.3

東京工業大学技術構造分析講座

正誤表

旧軍委託「二号研究」における臨界計算

本文全般		仁科芳雄の報告記録 → 仁科芳雄の報告 Kton → kton
p.1	註2	第16巻 → 第3巻
p.2	註6	Developpment → Développement reactions → réactions Flugge → Flügge
p.4	1.26	中性子により → 中性子として
p.7	註20	p.111 → p.111
p.14	1.17	Ga ²⁷ 等が考えられる → Ga等が考えられる ²⁷
p.22	1.22	示したいる → 示している
p.24	1.13	右辺 → 左辺

目次

深井 佑造	旧軍委託「二号研究」における臨界計算	1
山崎 正勝	理研の原子爆弾 一つの幻想 - 「完全燃焼」構想 -	25
小長谷 大介	Max Planck の熱輻射研究の方法的意味	33

資料紹介

山崎 正勝	東京第二陸軍造兵廠に対する仁科芳雄の報告	53
深井 佑造		
里見志朗		

博士論文梗概

高塚 秀治	鉄滓分析によるわが国前近代製鉄技術の研究	73
揚 艦	近代中国における物理学者集団の形成	85
姜 雄	植民地期朝鮮の工業化の技術指摘検討	95

修士論文梗概

岡田 大士	終戦直後の日本における大学改革の歴史的分析	105
詫間 直樹	日本のエレクトロニクス企業における基礎研究の意義	109
姜 波	パソコンOS における GUI 発展要因の分析	113

旧陸軍委託「二号研究」における臨界計算

深井佑造

1 はじめに

第二次大戦中に日本でウランによる中性子連鎖反応が組織的に研究されたのは、理化学研究所（以下、理研と呼ぶ）仁科芳雄研究室へ日本陸軍から委託された「二号研究」と、京都帝国大学荒勝文策教授研究室への日本海軍委託「F研究」の2件があった。「F研究」における臨界計算法開発の歴史については、先に、著者が「技術文化論叢」no.2に調査した結果を発表した¹。「F研究」の研究業績を記述した報告書や資料は、それが公開された論文ではなくても研究業績を理解するのに十分な内容を持っていた。しかし、「二号研究」での中性子連鎖反応の研究業績を学術的に理解するのに十分な記述のある資料は殆どない。表題に示された内容を窺い知る事の出来る資料は竹内桓の戦時中のメモがある²。物理的・技術的な内容を正確に知る事の出来る資料ではないが、「技術文化論叢」no.2に掲載し³、更に検討を加えた「東京陸軍第二造兵廠に対する仁科芳雄の報告記録」⁴がある。これ等を参考にして、更に、かように不十分な情報を現在の原子炉初等理論等にて補って、「二号研究」における臨界性研究の全貌を出来る限り正確に描いて見せる事にする。

本論文では、第2章で竹内のメモに示されている数値の検討を通じて理研での中性子連鎖反応系での臨界量計算方法の筋道を明らかにし、第3章では、理研で考えていた連鎖反応系に近い体系についての現在入手可能な測定値を基にして、臨界量計算法の問題点を検討する。第4章以降で、「二号研究」で考えられていた爆弾の爆発機構の中性子物理的内容を具体的に推定する。

2 竹内のメモに示されている数値の検討（その1）

竹内メモには、具体的に定義を記述してはいないが、“U235”として²³⁵U濃縮度 $\epsilon\%$ 、“Mg/lit H_2O ”として1リットルの軽水に均質混合した U_3O_8 の濃度、“ N_H/N_{238} ”：計算体系内の水素と²³⁸U原子核の比、“P”： $1-p$ 、 p は²³⁸Uによる共鳴吸収を逃れる確率、“R”：体系の臨界半径cm、“V”：体系の臨界体積リットル、“Xgr”：各濃縮度を持ったUの質量Kg、“U”：XgrのU量を得るために必要な天然ウランの量Kgの計算結果が表に示されている。又、「…… H_2O と、 U_{235} を種々の%で含む U_3O_8 で計算し、…」とあるので、燃料の形態は酸化ウラン（ U_3O_8 ）であり、そして、「実際問題として日本では D_2O を何十リットルとは到底入手不能だらうから目標として H_2O を使用する予定であった」と記載しているので、竹内の計算体系は、軽水に U_3O_8 を均質混合した炉心と考えてよい。又、体系は反射体を持たない球形である。反射体についての記述のないのは勿論の事、当時は反射

¹ 深井佑造；旧海軍委託「F研究」における臨界計算法の開発、技術文化論叢、no.2, p.27, 1999.

² 竹内桓；第10巻 物理学における戦争の投影、資料10-10、日本科学技術史体系、第16巻、p.446、日本科学史学会(1970)。

³ 山崎正勝、深井佑造；第二次大戦期における日本の核研究資料(1)、陸軍東京第二造兵廠に対する仁科芳雄の報告記録：1943年7月から1944年11月、技術文化論叢、no.2, p.45, 1999.

⁴ 山崎正勝、深井佑造、里見志朗；資料解説、東京第二陸軍造兵廠に対する仁科芳雄の報告記録：1943年7月から1944年11月、技術文化論叢、no.3, p.53, 2000.

体の効果に対する考えは無かったと考えてよい。当時の計算対象となる体系は、F.Perrin⁵, F.Adler等⁶や荒勝文策¹にしても、全て球形である。「計算してみても、水とウランの混合比に optimum の所があるのが判って喜んだり」とあるので、竹内の表の U_3O_8 濃度の数値は最適化された値であると考えられる。なお、竹内の10%濃縮度の U 濃度値にはミスプリント、又は書き移し時のミスと考えられる値があるので、“ $M_{gr}/litH_2O$ ” を与えている 350 に加えて、ここでの検討計算では 300 を追加する。

(1) “ N_H/N_{238} ” 値の検討

$\epsilon\%$ の濃縮度を持つ M_{gr} の U_3O_8 を $1000cm^3:1$ リットルの H_2O に均質混合する。従って、この均質系での U_3O_8 と H_2O の体積比 v_f, v_H は各々次のようになる。

$$v_f = \frac{M/\rho_f}{1000 + M/\rho_f}, \quad v_H = \frac{1000}{1000 + M/\rho_f} \quad (2-1)$$

ここで、 ρ_f は U_3O_8 の密度であり、竹内は $\rho_f = 4.2$ としている⁷。 N_H/N_{238} と N_H/N_{235} は正確には次のように書ける。

$$\frac{N_H}{N_{238}} = \frac{705\epsilon + 714(1 - \epsilon) + 128}{27(1 - \epsilon)(M/1000)} \quad (2-2)$$

$$\frac{N_H}{N_{235}} = \frac{705\epsilon + 714(1 - \epsilon) + 128}{27\epsilon(M/1000)} \quad (2-3)$$

所が、竹内は U_3O_8 の酸素の寄与を無視して N_H/N_{238} と N_H/N_{235} を求めた。

$$\frac{N_H}{N_{238}} = \frac{235\epsilon + 238(1 - \epsilon)}{9(1 - \epsilon)(M/1000)} \quad (2-4)$$

$$\frac{N_H}{N_{235}} = \frac{235\epsilon + 238(1 - \epsilon)}{9\epsilon(M/1000)} \quad (2-5)$$

ここでは、酸素の寄与を考慮した場合を case A、竹内の場合を case B とする。

表 1 N_H/N_{238} と N_H/N_{235} の計算値

U_{235} $\epsilon\%$	M_{gr} lit H_2O	case A	N_H/N_{238} case B	竹内	N_H/N_{235} case A	case B
100	40	∞	∞	∞	771.3	652.8
50	90	689.3	584.0	580	689.3	584.0
30	150	296.0	250.9	250	690.8	585.4
20	220	176.8	150.0	150	707.2	599.5
10	300*	115.4	97.82	98	1038.	880.4
10	350*	98.90	83.85	98	890.1	754.6
5	650	50.48	42.80	43	959.0	813.2
3	1000	32.14	27.25	27	1039.	881.1
2	1600	19.88	16.86	17	974.3	826.2

⁵F.Perrin; Calcul relatif aux conditions éventuelles de transmutation en chain de l'uranium, com. ren. , **208**, 1394, 1573 (1939).

⁶F.Adler; Developpment dans le temps des reactions en chaines dans une masse uranifere, com. ren. , **209**, 301(1939).

S.Flugge; Die Naturwiss., **27**, 402(1939).

⁷竹内証；山崎正勝教授に送られて来た 1998-2-13 付け手紙に添付されていた戦中のメモ。

(2) “P”、“R”、“V” 値の問題

共鳴吸収される割合 “P” については、竹内は「… U238 に capture される probability P が問題。これは Perrin の data を用いる。一部外挿する。」と書いている。「Perrin の data」とは J. de Phys. Rad.⁸に発表されているデータの事で、この値によって “P” の値が内挿・外挿されて掲載されている事は既に著者は確認している⁹。

²³⁵U 濃縮度 ε%、M_{gr}/1litH₂O の値、p:1-P の値及び核断面積を用いて竹内のメモ所載の方程式によって臨界半径 R を求めている。具体的な方法と問題点等については次章で検討する。竹内の表に与えられている “R” の数値を用いれば、体系の体積値 “V” が得られる。これは問題ない。

(3) “X_{gr}” と “U” 値の検討

M_{gr} の U₃O₈ を 1000cm³ の H₂O に混合すれば、この体系の平均密度 <ρ> は

$$\langle \rho \rangle = \frac{M}{1000 + M/\rho_f} \quad (2-6)$$

になる。この <ρ> によって、X_{gr} = <ρ> × V と計算して X_{gr} が求められる。所が、竹内は (2-6) 式 <ρ> の代わりに、

$$\langle \rho \rangle = M_{gr}/1litH_2O \quad (2-7)$$

の値を用いて計算している。これは体系が軽水のみであると考えている事に相当する。“X_{gr}” が得られれば、“U” は次式によって計算される。計算結果を表 2 に示す。

$$U = X_{gr} \times (\varepsilon\%/0.72\%) \quad (2-8)$$

表 2 X_{gr} と U の計算値

U ²³⁵ ε%	M _{gr} 1litH ₂ O	<ρ>	(2-6) 式	X _{gr} Kg (2-7) 式	竹内	(2-6) 式	U Kg (2-7) 式	竹内
100	40	0.040	0.614	0.62	0.62	85.30	86.1	86
50	90	0.088	1.69	1.73	1.73	117.5	120.0	120
30	150	0.145	2.94	3.05	3.04	122.5	126.9	127
20	220	0.209	4.43	4.66	4.67	123.1	129.6	130
10	300*	0.280	10.3	11.1	11.1	143.5	153.8	152
10	350*	0.323	11.9	12.9	11.1	165.6	179.4	152
5	650	0.563	27.9	32.2	32.2	193.9	223.9	224
3	1000	0.808	71.0	87.9	87.9	295.8	366.3	367
2	1600	1.16	213.	294.	294	592.2	817.8	818

以上の結果をまとめ、表 1 と表 2 の値から次の事が分かる。

- (i) 10%濃縮度の U₃O₈ 濃度は 300 の方が竹内の表の数値に一致するので、350 の値はミスプリントか、書き移し時のミスと考えられる。表には*印を付けた。

⁸H. Halban, F. Joliot, L. Kowarski, F. Perrin; Mise en evidence d'une reaction en chaine au sein d'une masse uranifere, J. de Phys. Rad., 10, 428 (1939).

⁹前掲 1 の p.36, 表 3 参照。

(ii) N_H/N_{238} の値は、 U_3O_8 を H_2O に均質混合しているのであるから、(2-2) 式が正確であると考えられるが、酸素の寄与を無視した竹内の考えもあるので、ここでは、前者を標準として case A と呼び、同時に case B の場合も検討して見る事にする。前者の N_H/N_{238} 自体の値は後者よりも約 18% 増しになっている。

(iii) X_{gr} と U についても、竹内のように体系が軽水のみであるとして求める方法には抵抗がある。

なお、以降の議論では竹内の表から読み取れる「10%濃縮度の約 10Kg の U_3O_8 量」という値は、しばしば検討・計算の対象になる。

3 竹内のメモに示されている数値の検討 (その 2)

前章で検討を保留した臨界半径 “R” を求める計算法について検討する。竹内のメモには、臨界量の計算式を次のように示している。

$$\frac{\lambda}{3} \Delta v F + [n(\nu_0 - 1)S_a - \sum_i n_i S_{ai}] v F = 0 \quad (3-1)$$

ここで、 λ は次式である。

$$1/\lambda = nS_{sc} + \sum_i n_i S_{sci} + n(\nu_0 - 1)S_a - \sum_i n_i S_{ai} \quad (3-2)$$

この時期の臨界計算は殆どの場合 F.Perrin が提示した方程式に従っている⁵。Perrin は中性子エネルギーを高速と熱組の 2 組に分けた次の式を考えている。

高速組：

$$\frac{\lambda_f}{3} \Delta v_f F + \nu_0 n S_a v F - n_H \sigma_H v_f F = 0 \quad (3-3)$$

熱組：

$$\frac{\lambda_t}{3} \Delta v F + p n_H \sigma_H v_f F - (n S_a + \sum_i n_i S_{ai}) v F = 0 \quad (3-4)$$

下付き添字の f は高速組、下付き添字の t は熱組を示す。ここでは、高速エネルギー中性子による U の核分裂反応は無視出来る程小さいとする。これは軽水との均質混合体系では許される近似である。(3-3) 式の高速組では、熱中性子による U の核分裂反応により $\nu_0 n S_a (vF)$ の発生があり、水素により $n_H \sigma_H (v_f F)$ が減速により高速組から失われる。(3-4) 式の熱組では、高速組から減速で熱組へ入って来る中性子の内、共鳴吸収を逃れた割合 p だけの $p n_H \sigma_H (v_f F)$ が熱組に現れ、熱エネルギー中性子により体系内の全ての物質に吸収される分が失われる。

ここで、(3-3) 式に p を乗じ、(3-4) 式に加えると次式になる。

$$\frac{\lambda}{3} \Delta v F + [n(\nu_0 p - 1)S_a - \sum_i n_i S_{ai}] v F = 0 \quad (3-5)$$

ここで、中性子の漏れの項を次のように置いた。

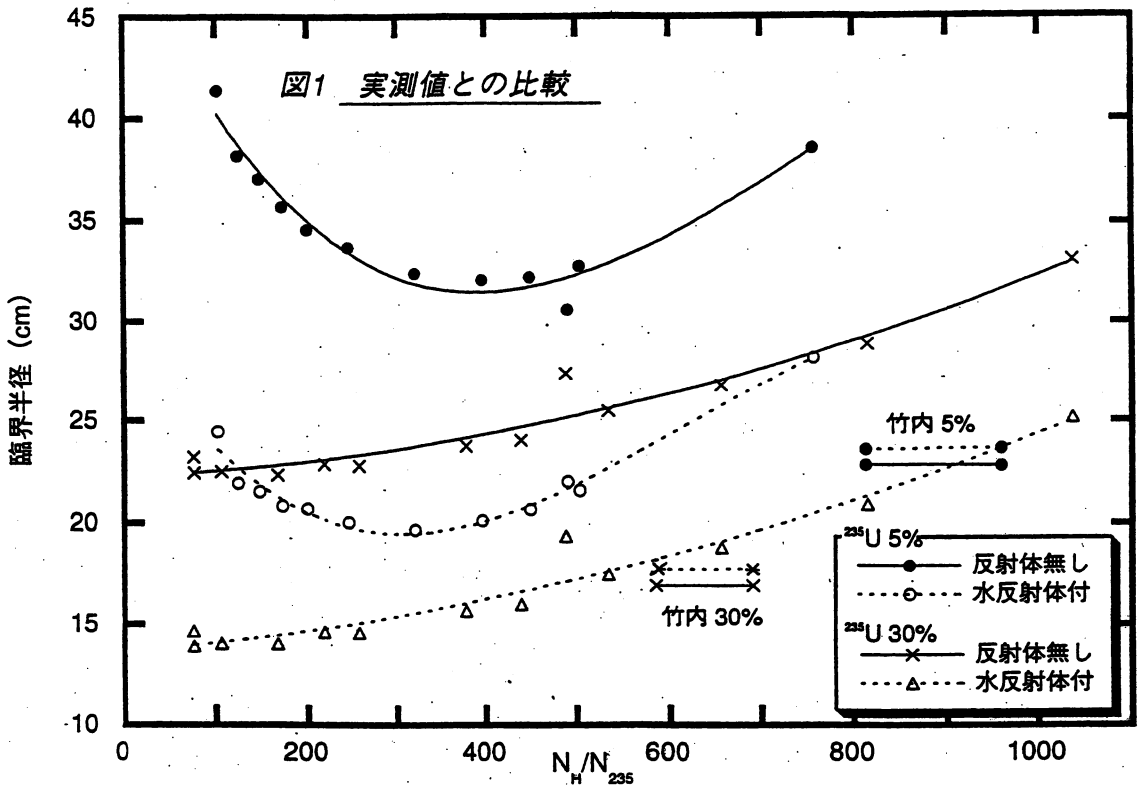
$$\frac{\lambda}{3} \Delta v F = \frac{\lambda_f}{3} p \Delta v_f F + \frac{\lambda_t}{3} \Delta v F \quad (3-6)$$

(3-5) 式を (3-1) 式と比較すると、第 2 項目の式の ν_0 が $\nu_0 p$ に代わっている。これは ^{238}U による共鳴吸収効果を考慮すれば、このような形になるのは妥当であるから、竹内の計算でも用いられたと

考えられる。又、(3-5)式と(3-6)式は、中性子数の平衡関係を正確に考慮している。もし、(3-2)式の λ が

$$\lambda = \lambda_c \left(1 + \frac{\lambda_f p \Delta v_f F}{\lambda_c \Delta v F} \right) \quad (3-7)$$

で計算出来る方法が提案されていれば問題はない。しかし、一般的には(3-7)式は解けない。(3-7)式右辺の第2項の比；即ち、高速組と熱組の中性子の漏れの割合を何等かの方法で近似すれば、この問題は解ける筈である。特に、軽水減速体系では熱組中性子吸収の効果が大きいので、高速組中性子の漏れ効果の評価は重要である。軽水減速体系の臨界性の計算で、1960年代に“改良1組近似法”と言われる計算法が用いられている¹⁰。所が、竹内の計算で用いられている(3-2)式を見ると、第1と2項は高速組の $1/\lambda_f$ であり、残りの項は(3-1)式の第2項の vF の係数であるから、この項は本質的に正でなければならない。従って、(3-2)式で表されている λ は λ_f よりも小さい。即ち、正確には高速組と熱組の中性子の漏れを両方とも考慮せねばならないのに、竹内の提案式は高速組の中性子の漏れすら少な目に見積もっている。これは同時に臨界半径値を過小評価；臨界性には楽観的の評価になっている。



¹⁰例えば、Y.Fukai, A.Shimizu, S.Miyamoto; Calculations of Flux Distribution in a Boiling Water Reactor, Nucl. Sci. Eng., 6, 209(1959). の p.229 の (9) 式参照。

竹内のメモは数値計算に必要な詳細な情報を与えていない現状では、これ以上、このような道筋で検討を続ける事は無意味である。そこで、竹内の表の“R”値の妥当性の判断を実測値との比較で検討する。 U_3O_8 は水に溶けない。従って、 U_3O_8 を H_2O に均質混合した体系の実測値などは存在しない。竹内の計算体系に近い反射体無しの球形体系での実測値を探した。H.C.Paxton, N.L.Pruvostが編集した報告書に¹¹、 U_3O_8 と有機材に均質混合した体系と UO_2F_2 水溶液の実測値が発表されている。勿論、記載された生のデータは現在の原子炉初等理論を用いて、 U_3O_8 と H_2O の均質混合体系の値に補正する。その具体的方法を付録Aに述べた。付録Aの方法によって求めた濃縮度5%と30%の U_3O_8 と H_2O の均質体系の実測値と竹内の計算値との比較を図1に示した。図は N_H/N_{235} の関数として濃縮度5%の場合を●印、30%の場合を×印として示している。表1に示した2つの N_H/N_{235} 値の幅の範囲に竹内が計算した臨界半径があるとした。明らかに、竹内の計算は臨界半径値を過小評価：臨界性に対しては楽観的評価になっている。実測の臨界半径は低い濃縮度5%の場合には約2倍、30%の場合には約1.5倍になっている。濃縮度の高い程体系内での中性子吸収の割合が大きいのので、即ち、中性子漏れの効果は相対的に低下しているため、竹内の計算との比較に見るように、30%の場合の方が実測値との差は小さくなる。

この楽観値を竹内の資料から定量的に説明出来るかも知れないのは、 ν_0 と p 値である。 ν_0 値は、多分Perrinからと思われる 3^{12} を使用しているが、荒勝は2.5¹³、現在の知識から考えても2.5の方が妥当である。 p 値は、現在の原子炉初等理論では戦中・戦後の多くの実験値からfittingした式があって、これを用いると竹内が採用したPerrinの値は過小評価である事が分かっている。修正は付録Aに述べている方法と同様な次式による。

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{M^2} \left(\frac{R}{\pi} \right)^2 \right] \frac{\Delta(\nu_0 p)}{\nu_0 p} \quad (3-8)$$

この補正式による結果を図1に示した。濃縮度5%の場合で約4%、30%の場合で約5%増になるに過ぎず、この補正では実測値との差を説明する事は出来ない。

Paxton-Pruvostの報告書には、軽水反射体付きの臨界半径の実測値が収録されている。この値を図1に、濃縮度5%の実測値の場合を○印、30%の場合を△印として示した。反射体付きの値との比較では、5%の場合にはなお計算値と実測値との差があるが、30%の場合には略一致していると考えてよい。前に述べたように、竹内の計算法では、中性子の漏れの効果を過小評価して臨界性を楽観化した。反射体を連鎖反応系に用いる事は体系から中性子が漏れるのを体系へ戻すという効果があるから、実効的には中性子の漏れを減少させるという効果を持つ。従って、竹内の計算結果について、濃縮度5%の場合よりも30%の場合の方が実測と一致する事は理解出来る。

東京第二陸軍造兵廠に対する仁科芳雄の報告記録には¹⁴、仁科は「動力的ニ徐々ニ行ハザル場合ニ於テハ……エネルギー発生セシムルニハ徐々ニ行ナハシムルガ良シト思ハル、即チ、反応ノ為発熱ヲ伴ヒ、従ッテ、ウラン濃度ヲ低下スルコトナル、濃度薄クナレバ反応ガ止マル迄ニナルノデハナイカ。然ル場合、温度低クナリ再ビ濃度ヲ増ス関係上、反応行ハル」と言っている。これが理研で描いた原子炉の特性である。即ち、炉は制御棒で出力制御するのではなく、臨界性ぎりぎりのウラン濃度で出力自己制御するwater boiler型である。そして、後に述べる事になるが、その臨界特性は竹内の結果の内、濃縮度10%の場合の値を持つ体系と考えている。

¹¹H.C.Paxton, N.L.Pruvost; *Critical Dimensions Systems Containing ²³⁵U, ²³⁹Pu, and ²³³U, 1986 Revision*, LA-10860-MS, UC-46, July 1987. この報告書は米国のORNLや英国のDounreay Experimental Reactor Establishment等で1960~1960年間で実施された測定値を収集・編集した資料である。実験・測定した原論文は日本では入手出来ない。

¹²前掲5。

¹³前掲1.p.33, 表2。

¹⁴前掲3。

現在、反射体の無い連鎖反応体系は現実には考えられない。日本の戦前の論文や戦中の資料には、反射体を連鎖反応体系に設けたという事実は全く見当たられない。しかし、戦前に発表された理研の研究者も読んだと思う H.L.Anderson らの有名な論文には¹⁵、実験体系として連鎖反応部の外周には軽水が満たされている。S.Weart の論文¹⁶の連鎖反応研究の歴史には、研究の進展中のある時期では反射体付き連鎖反応体系を採用していたという事実を述べている。日本でも開発研究が更に進展すれば、反射体付き連鎖反応体系を考えるようになったであろうと主張するのは合理的であると思う。戦後、日本は「二号研究」の均質軽水減速炉と似たような water boiler 型研究用原子炉を米国から輸入して運転した。

表3 竹内の計算結果と JRR-1 の特性の比較

項目		竹内の計算結果		JRR-1 の特性
濃縮度	%	10	20	20
燃料形態		U ₃ O ₈		UO ₂ SO ₄
臨界量	Kg	11.1	4.67	5.85
U 濃度	gr/lit	300	220	240
装荷量	Kg	—	—	6.48
反射体		軽水?		黒鉛

日本原子力研究所東海研で 1956 年 8 月に建設を開始した JRR-1 で 1957 年 8 月 27 日、日本で初めて連鎖反応が起った。竹内の値との比較を表 3 に示した。以降の議論では、竹内の計算結果は反射体付き連鎖反応体系での値であるとするの合理的と考える事にする。

4 「二号研究」で開発予定であった爆弾は核爆発を起こすか？

4.1 「二号研究」爆弾を考察するための基礎知識

戦後、「二号研究」を委託した陸軍航空本部安田本部長は、爆弾の開発目標爆発力について、「…得られるエネルギーは黄色薬約 18000 トンの爆発により発生するエネルギーに相当す」と述べている¹⁷。黄色火薬はピクリン酸を主体とする爆薬で TNT の 1.11 倍の爆発熱を生ずるので¹⁸、「二号研究」での開発爆弾は、

$$TNT \text{ 換算で } 20\text{kton} \quad (4-1)$$

を目標にしていたと考えられる。広島に投下された爆弾は約 15kton、長崎投下の爆弾は約 22kton の爆発力¹⁹、これらと同程度の規模を想定していた事が分かる。又、J.C.Mark は Pu 爆弾の正規の爆発力は 20kton であると述べている²⁰。核分裂爆弾は色々な制約があるので、最高限界の爆発力は 25kton であるという。

一般に、化学爆薬による爆弾では、点火した爆薬は出来る限り急速に化学反応が促進され、弾頭の爆薬を収納した容器の破壊限界まで化学エネルギーを集積させ、容器の破壊と同時に集積した化学

¹⁵H.L.Anderson, E.Fermi, L.Szilard; Neutron Production and Absorption in Uranium, Phys. Rev., 56,284(1939).

¹⁶S.Weart; Secrecy, Simultaneous Discovery, and the Theory of Nuclear Reactor, Am.J.Phys., 45,1049(1977).

¹⁷安田武雄; 日本における原子爆弾製造に関する研究の回顧、原子力工業、第 1 巻、第 4 号,p.44,1955 年 7 月号。陸軍航空本部鈴木辰三郎技術部員の手記による。

¹⁸日本化学会編; 化学便覧、応用化学編 II、材料編、p.1459、丸善、平成 2 年。

¹⁹R.Serber; the Los Alamos Primer, Univ.of Calif. Press(1992)

²⁰J.C.Mark; Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium, Science & Global Security, 4, 'p.111(1993). Mark は 1947 年 Los Alamos 研究所に入所し、理論部に属し、Project Y にも参加している。1972 年に理論部長を最後に MIT に移った。

エネルギーが一気に解放される。これが、爆弾の破壊力になる。これから、必要な物理的主条件は、(i) 反応の急速性、(ii) 多量のエネルギーの集積性である事が分かる。これは核爆弾の場合にも共通する条件である。連鎖反応では中性子を媒介として繰り返される U や Pu の核分裂反応の持続により多量のエネルギーが発生する。ここでは、中性子が U や Pu を核分裂させ、核分裂により発生した中性子が再び U や Pu を核分裂させ…という継続的な繰り返し反応が起こる。初めの中性子が次の中性子を発生させるまでの時間を中性子サイクル時間、または、中性子寿命： ℓ と云う。初めの中性子が U や Pu を核分裂させ、中性子の数を増加させる割合を余剰反応度： Δk で表す。即ち、 Δk は1サイクル毎に中性子数を増加させる割合で、 Δk 値が高い程、サイクル毎の核分裂反応が多く起り、中性子数はネズミ算的に急速に増加する事になる。そこで、(i) 反応の急速性の点からは、連鎖反応系の ℓ は短い方がよく、(ii) 多量のエネルギーの集積性の点からは、 Δk は高い方がよい。この Δk 値が爆発力の原動力になっている事が理解出来るであろう。

連鎖反応系での核分裂エネルギーの増加は定量的に次のような計算で得られる。ある時刻 t での中性子数を n とし、その時の余剰反応度を $\Delta k(t)$ で表すと、体系の中性子数の時間変化はサイクル時間 ℓ 毎の $\Delta k(t)n$ で与えられる。

$$dn/dt = \Delta k(t)n/\ell \quad (4-2)$$

中性子数だけ核分裂反応が起こると考えてよいので、連鎖反応系での fission 数 $F(t)$ は (4-2) 式を積分する事で得られる。

$$F(t) = \exp(K(t)) \quad (4-3)$$

上の式での $K(t)$ は次の式で表される。

$$K(t) = \frac{1}{\ell} \int_0^t \Delta k(t') dt' \quad (4-4)$$

ここで、 $t=0$ で、 $F(0) = 1$ とおいた。核爆弾、特に、 Pu 爆弾では体系が臨界になる時刻と連鎖反応が開始する時刻とは必ずしも一致しない。しかし、ここでは予め体系内に一定の強度を持つ中性子源が設置されているとする。

$$t = 0 : \Delta k(0) = 0 \quad (4-5)$$

ここでは、これを初期条件とする。更に、 ^{235}U の遅発中性子の内、一番早く発生する遅発中性子の半減期は 0.23 秒であるから、核爆発のような早い反応では、このような遅発中性子の効果は無視出来る。

^{235}U の 1 fission で発生するエネルギーは $200MeV = 7.64 \times 10^{-15} Kcal$ (Pu の場合も略同じである) で、 ^{235}U の消滅する割合は 1 fission 当たり $3.91 \times 10^{-22} gr$ 。発生エネルギーの TNT 換算では、 $900Kcal/KgTNT$ の値を用いる。(4-3) 式によって、一般に K 値を与えると、 $Kcal$ で表示される発生エネルギー： C 、消費される核分裂性物質質量： U 、TNT 換算値： TNT が計算される。

この論文で問題になる K の 34~57 の範囲の値について次頁の表 4 に掲載した。参考として、表に“Mark による”と示した comment では Mark が定義した Pu 爆弾の爆発力に対する発生エネルギー値と反応が起こってから予想される Pu 爆弾内部の状態を説明している。 Pu 爆薬量を 10Kg と想定して、 K が 35 の時には爆薬の温度は $30^\circ C$ しか上昇しない。42 で Pu が蒸発して爆薬内部はメガバール (100 万気圧) になるが、弾頭は未だ破壊しない。そして、45 が爆発の最低点になるが、超臨界状態は続きエネルギーは発生し続ける。不発弾 (fizzle) となってしまう原子爆弾としての最低限度は TNT 換算値で、0.5kton ($K =$ 約 52) と考え、正規の爆発力は 20kton ($K =$ 約 56) と定義して

いる。又、アンダーラインで示したエネルギー値は Borax-I による破壊実験で発生した核分裂エネルギー値である。

表4 K 値による F、C、U、TNT の値

K	F	C Kcal	U gr	TNT ton	comment
34	$5.83 \times 10^{+14}$	4.46	2.28×10^{-7}	4.95×10^{-6}	
35	$1.59 \times 10^{+15}$	$1.21 \times 10^{+1}$	6.19×10^{-7}	1.35×10^{-5}	30 °C 上昇 {
36	$4.31 \times 10^{+15}$	$3.29 \times 10^{+1}$	1.68×10^{-6}	3.66×10^{-5}	↑
37	$1.17 \times 10^{+16}$	$8.95 \times 10^{+1}$	4.58×10^{-6}	9.94×10^{-5}	↑
38	$3.19 \times 10^{+16}$	$2.43 \times 10^{+2}$	1.24×10^{-5}	2.70×10^{-4}	↑
39	$8.66 \times 10^{+16}$	$6.61 \times 10^{+2}$	3.38×10^{-5}	7.35×10^{-4}	↑
40	$2.35 \times 10^{+17}$	$1.80 \times 10^{+3}$	9.19×10^{-5}	2.00×10^{-3}	↑
41	$6.40 \times 10^{+17}$	$4.89 \times 10^{+3}$	2.50×10^{-4}	5.43×10^{-3}	↑
42	$1.74 \times 10^{+18}$	$1.33 \times 10^{+4}$	6.79×10^{-4}	1.48×10^{-2}	メガバール発生
43	$4.73 \times 10^{+18}$	<u>$3.61 \times 10^{+4}$</u>	1.85×10^{-3}	4.01×10^{-2}	↑
44	$1.29 \times 10^{+19}$	$9.82 \times 10^{+4}$	5.02×10^{-3}	1.09×10^{-1}	↑
45	$3.49 \times 10^{+19}$	$2.67 \times 10^{+5}$	1.36×10^{-2}	2.97×10^{-1}	最低限度
46	$9.50 \times 10^{+19}$	$7.26 \times 10^{+5}$	3.71×10^{-2}	8.06×10^{-1}	↑
47	$2.58 \times 10^{+20}$	$1.97 \times 10^{+6}$	1.01×10^{-1}	2.19	↑
48	$7.02 \times 10^{+20}$	$5.36 \times 10^{+6}$	2.74×10^{-1}	5.96	↑
49	$1.91 \times 10^{+21}$	$1.46 \times 10^{+7}$	7.45×10^{-1}	$1.62 \times 10^{+1}$	↑
50	$5.18 \times 10^{+21}$	$3.96 \times 10^{+7}$	2.03	$4.40 \times 10^{+1}$	↑
51	$1.41 \times 10^{+22}$	$1.08 \times 10^{+8}$	5.50	$1.20 \times 10^{+2}$	↑
52	$3.83 \times 10^{+22}$	$2.93 \times 10^{+8}$	$1.50 \times 10^{+1}$	$3.25 \times 10^{+2}$	不発弾状態
53	$1.04 \times 10^{+23}$	$7.96 \times 10^{+8}$	$4.07 \times 10^{+1}$	$8.84 \times 10^{+2}$	↑
54	$2.83 \times 10^{+23}$	$2.16 \times 10^{+9}$	$1.11 \times 10^{+2}$	$2.40 \times 10^{+3}$	↑
55	$7.69 \times 10^{+23}$	$5.88 \times 10^{+9}$	$3.01 \times 10^{+2}$	$6.53 \times 10^{+3}$	↑
56	$2.09 \times 10^{+24}$	$1.60 \times 10^{+10}$	$8.17 \times 10^{+2}$	$1.78 \times 10^{+4}$	正規の爆発
57	$5.69 \times 10^{+24}$	$4.34 \times 10^{+10}$	$2.22 \times 10^{+3}$	$4.83 \times 10^{+4}$	↑

Mark による

アンダーライン の値は Borax-I 破壊実験時のエネルギー

4.2 資料から読み取れる「に号研究」開発爆弾の問題

前節冒頭の開発目標を述べた安田の文の前段には²¹、「原子核分裂によるエネルギーを利用する為には1回分として最小限 U_{235} を10%に濃縮せるウランウム約10Kgを必要とす」とあり、「東京第二陸軍造兵廠に対する仁科芳雄の報告記録」にも開発対象にした核爆薬の特性として「 U_{235} ヲ10%含有シテイルモノガ10K 位必要デアルコトハ計算カラ出タ」と述べている。これらの資料から「二号研究」で開発の対象になった核爆薬の仕様を次のように設定する事にする。

$$10\%^{235}U \text{ 濃縮度、} U_3O_8 11Kg、\text{ 臨界半径 } R_c = 20.7cm \quad (4-6)$$

これは竹内の表に示された10%濃縮度の数値に相当しているが、前章で検討したように、これらの数値は軽水反射体を持った場合で実際に近い結果を与えるので、ここでは、この前提条件の下で検討

²¹前掲 17.

を加えている点を注意しておきたい。

「仁科芳雄の報告記録」には「爆弾トスル場合過剰ノ10Kgヲ損失スルコトトナル關係上」とあるので、弾頭への爆薬の装填量について、次のように考える²²。

$$\text{装填量} = 2 \text{倍} \times (\text{臨界量}) \quad (4-7)$$

「二号研究」の爆弾の爆発力を検討するのに、上記の装填量に対する情報は有用である。一般に、核分裂爆弾では装填量が臨界量に対して、どの程度多くすべきかという問題は重要である。即ち、爆発力を強大にするためには、なるべく装填量を大きくすべきであるが、一方では、臨界量を超えて非常に大きくする事は予期しない場面での連鎖反応の惹起を招く事になる。Los Alamos Primer では2倍を設定している²³。Markは1945年7月のTrinity核実験の結果を参照にして、無反射体の臨界量の半分程が装填量になると述べ、自己の論文ではPu爆弾の装填量を10Kgとして検討を進めている²⁴。これらの戦中・戦後の米国の情報等から、「二号研究」でも(4-7)式が設定されていたという事は驚くべき事実である。

更に、「仁科芳雄の報告記録」には「爆発威力大ナル成分温度トナス為ニハ1/20乃至1/30秒の時間」を要す、という記述がある。これも興味ある情報で、この「二号研究」では爆弾が連鎖反応を続けている時間が、

$$1/20 \sim 1/30 \text{ 秒} \quad (4-8)$$

であると考えていた事が分かる。

(4-6)式と(4-7)式に与えられた情報によって、竹内が示した表1の値について、case Aとcase Bの最高の余剰反応度 Δk_{max} を求める。初等原子炉理論を用いると、臨界条件は

$$k_{\infty} = 1 + M^2 B_c^2 \quad (4-9)$$

ここで、 B_c は臨界半径 R_c によるバックリングで、球形体系では $B_c = \pi/R_c$ である。前章に述べたように、竹内が計算した結果の R_c は楽観的であるから、初等原子炉理論を用いた k_{∞} の計算値と竹内の R_c を用いた(4-9)式の k_{∞} 値とは一致しない。以降の計算では、初等原子炉理論の諸式を用いるため、この不一致を(4-9)式が成立するように初等原子炉理論による k_{∞} 値に補正因子を乗ずる事にする。(4-7)式によって、爆弾のバックリングBは

$$R = 1.26 R_c \quad (4-10)$$

の半径になり、 $B = \pi/R$ である。そこで、初等原子炉理論により、

$$\Delta k_{max} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} - 1 \quad (4-11)$$

と与えられるので、(4-9)式と(4-10)式によって(4-11)式は次のようになる。

$$\Delta k_{max} = \frac{0.37 M^2 B_c^2}{1 + 0.63 M^2 B_c^2} \quad (4-12)$$

(4-12)式により竹内が計算した例の Δk_{max} 値は次頁の表5のようになる。

²²前掲3又は4。

²³前掲19。

²⁴前掲20。高速中性子による臨界量(dry criticalと呼ぶ)について、²³⁹Puは無反射体で16.22Kg、反射体付きで5.73Kg、無反射体の半分は反射体付きの1.4倍、²³⁵Uは無反射体で48.8Kg、反射体付きで16.28Kg、無反射体の半分は反射体付きの1.5倍になっている。更に、Markは²³⁹Puの装填量を10Kgとしているので、これは反射体付きの量の約2倍である。

次に重要な問題は(4-4)式のサイクル時間 ℓ 値である。この式を見ると、この値が2倍変わると K 値は $1/2$ になり、表4に見るように fission 数の桁が変わって来る。pulsed neutron experiment で、0.7~5.6 リットルの軽水に 14MeV の中性子を打ち込むと、その中性子が吸収されて消滅する迄の時間は、23°Cで $206 \pm 6 \mu \text{ sec.}$ であった。この値は高速中性子が減速する時間と熱中性子が吸収される迄の時間の和である。減速時間は $\mu \text{ sec.}$ 程度であるから、これを核分裂で発生する中性子について適用しても差し支えない。一方、純水の吸収断面積は $2.226 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-1}$ で、この消滅する迄の時間は純水のこの吸収断面積に相当した時間と考えられる。連鎖反応体系では U による吸収で中性子の寿命が尽きるので、純水の吸収断面積よりは体系の持つ大きい吸収断面積によってサイクル時間 ℓ 値が決定される。竹内が計算した例に対する ℓ 値も表5に示した。表5のサイクル時間の値の妥当性を確認するために、数十基の実際に運転された軽水減速炉の中性子寿命の値を調査した。その幾つかの例を付録BのB-1章に示した。これらにより、表5のサイクル時間の値が妥当である事が確認された。

表5 竹内の例の Δk_{max} とサイクル時間 ℓ 値

濃縮度 ϵ %	$Mgr/litH_2O$		Δk_{max}		サイクル時間 ℓ 10^{-4} 秒	
	case A	case B	case A	case B	case A	case B
100	40	47	0.269	0.268	0.600	0.532
50	90	106	0.249	0.247	0.558	0.494
30	150	177	0.243	0.242	0.565	0.502
20	220	260	0.238	0.237	0.581	0.518
10	300	354	0.191	0.190	0.764	0.692
10	350	413	0.190	0.189	0.696	0.627
5	650	767	0.166	0.165	0.761	0.696
3	1000	1179	0.125	0.124	0.835	0.771
2	1600	1887	0.0825	0.0820	0.858	0.799

この表に case B について、異なった " $Mgr/litH_2O$ " の値があるのは、酸素の原子量を無視した竹内の表の値に一致した " N_H/N_{238} " の値を尊重して、酸素を原子量に考慮した場合の $U_3O_8 - H_2O$ 系に正確に適用出来るように、その " $Mgr/litH_2O$ " 値を調節した結果である。

(4-8) 式の爆弾としての反応の継続する時間は、一般に高速中性子による原子爆弾で予想されている 10^{-6} 秒に比べると極端に長い。これが「二号研究」で考えられた熱中性子による爆発現象のためであるとすると、この爆弾は原子炉の暴走・破壊の際の反応と似ているのではないかという予想に従って、米国で実施された Borax 等の暴走・破壊実験の結果を分析して、「二号研究」で予測される結果と比較・検討した。米国の暴走・破壊実験の結果の概要を付録BのB-2章にまとめた。これらの結果を分析すると、原子炉の暴走・破壊の現象とは、先ず、(a) 炉心への急速な反応度付加がある。Borax I で $0.165 \Delta k/s$ である。(b) この反応度付加によって熱出力が急速に増加し、燃料温度も上昇し、除熱機構が働く前に燃料が溶解した。(c) この状態が炉心全体に広がり、炉心が完全に破壊された。(d) この際、溶解した高温燃料が減速材の軽水に触れて、金属-水の化学反応を含めた水蒸気爆発が生じた。(e) ここで、連鎖反応は停止した。発生した核エネルギーは 140MWs 程度であり、金属-水の化学反応エネルギーを含めて、原子炉容器内の圧力は最高 700 Kg/cm^2 程度になる。(f) 原子炉容器は Borax I の容器のみが破裂し、他の場合は変形したのみであった。この現象を基にして、「二号研究」爆弾の問題を考えてみる。この弾頭は均質連鎖反応系であるから、原子炉の暴走・破壊の場合とは異なり炉心構造の破壊による反応の停止という事はない。Borax I の暴走試験と同じ時期に、軽水減速均質炉の試験も実施された。この試験の結果は非均質炉 Borax I よりも安定で破壊に至

らない事が確認されている。それは炉心が外部の冷却系と接続していて、熱出力急増に応じて均質混合燃料体が膨張して、その一部が炉心から冷却系を通して炉心外部に逸出し、炉心の反応度が低下して連鎖反応を抑えた結果による。しかし、「二号研究」爆弾では外部に均質混合燃料体は逸出しないように作られる筈である。即ち、暴走・破壊試験の(f)の結果を参考にすると、核爆薬を装填した容器の健全性は内部の核分裂反応による圧力にかなりの程度まで耐える事が出来て、しかも、Borax I と異なり均質反応系のために核分裂反応自体が炉心の構造的破壊により停止する事もないであろう。これは「二号研究」爆弾が核爆発をする可能性がある事を示している。

Mark の論文に見られるように、 $\Delta k(t)$ の時間変化を線形と仮定し、(4-5) 式と $t = t_0$ で $\Delta k(t_0) = \Delta k_{max}$ という境界条件を用いると、 $\Delta k(t)$ は

$$\Delta k(t) = \Delta k_{max}(t/t_0) \quad (4-13)$$

になる。この式を(4-4)式に用いて積分をすると、次の $K(t_0)$ が得られる。

$$K(t_0) = \frac{\Delta k_{max} t_0}{2 \ell} \quad (4-14)$$

表5に示した竹内の濃縮度10%の4caseについて、(4-1)式の開発目標を満足するような t_0 を(4-14)式によって計算すると、表6のようになる。この表の t_0 の値は「仁科芳雄の報告記録」に書かれている爆弾の反応時間：1/20~1/30秒を満足している。当時の核物理関係の研究者は“連鎖反応は爆発的に起こるものである”と考えていたという事実を、著者は指摘しておいた²⁵。理研では熱中性子による核爆発も反応時間が適当の長さで維持出来れば実現すると考えていたものと思われる。

表6 「二号研究」爆弾の開発目標を満足する t_0 値

	case A		case B	
$M_{gr}/1litH_2O$	300	350	354	413
爆発力 kton	22.04	19.89	20.10	20.05
t_0 秒	1/22.25	1/24.30	1/24.43	1/26.78

しかし、理研が開発を目指した核爆弾に対する上記の考え方には、“物理的に重大な見落とし”があった。それは、表4の消費する核分裂性物質質量：“U”の欄を見ると爆発力が20Ktonに近くなると、かなりの量の消費があるので、この消費量が $\Delta k(t)$ 値に影響を与えるという点に気が付いていなかった。

4.3 消費する U 量を考慮に入れた $\Delta k(t)$ の計算

この問題を論ずる前に、核爆弾の特性を検討する際の前提条件である反応度付加の速度について考える。これは“どのようにして核弾頭を急速に超臨界の状態にするか”という具体的な方法の提案である。Markによると、Pu爆弾では核弾頭の周囲に装填した火薬の爆発で発生した衝撃波を、予め密度を低めにした核爆薬の中心に向けて集中して核爆薬を高密度化する事で超臨界の状態にする。つまり爆縮である。この時、5km/sの衝撃波が核弾頭中心に達する時間は 10^{-5} 秒で、核弾頭の Δk_{max} は1.7であるから、反応度付加率は $1.7 \times 10^{15} \Delta k/s$ になる。U爆弾の場合には爆縮法の必要はなく、砲弾型の反応度付加になる。この際の砲弾の速度は0.3km/sであるという。更に、 Δk_{max} は1.3であるから、反応度付加率は $7.8 \times 10^{13} \Delta k/s$ になる。かようにして、核爆弾を開発するため

²⁵ 深井佑造；原子力開発史：中性子連鎖反応実現への遙かな道、日本原子力学会誌、39,546(1997)。戦時中で原子爆弾は高速中性子による事を指摘したのは、「伏見語録 77 才二四三五六七七」に述べている伏見康治、Smyth 報告書 2.1 節には米国海軍の関係者との会議で、E.Fermi が同様の事を述べたと言っている。

には具体的な反応度付加の方法の提案が本来あるべきである。しかし、「二号研究」に関しては、これに関する資料や情報は皆無である。これは「二号研究」では、こうした問題を検討する段階にまでに至っていなかったとも考えられる。今後、調査が進展して新しい資料や情報が得られた時期に詳細な検討をすべきであるが、ここでは、やむを得ず反応度付加率をパラメータとして「二号研究」の爆発特性を検討する。

考えられる上限として、反応度付加率を砲弾型と同じである $7.8 \times 10^{+3} \Delta k/s$ と設定するのは合理的な取扱いであろう。そして、その値以下の幾つかの反応度付加率を設定する。消費する U 量を考慮に入れた具体的計算方法を付録Cに示した。前節と同様に、表5の濃縮度10%の場合についての計算結果を表7に掲げた。

表7 消費する U 量を考慮に入れた濃縮度10%の計算結果

Δk 付加率 $\Delta k/s$	反応継続 時間 秒	最終 ϵ %	最高 Δk	その時間 秒	爆発力 TNT ton
	case A	$Mgr/1litH_2O = 300$			
$7.8 \times 10^{+3}$	0.022	9.16	0.191	2.43×10^{-5}	120
9.5	0.031	8.52	0.191	0.024	96.2
7.6	0.033	8.68	0.191	0.027	103
5.7	0.037	8.88	0.191	0.033	111
* 3.8	0.045	9.11	0.161	0.042	106
2.85	0.051	9.28	0.141	0.048	94.8
1.9	0.062	9.47	0.117	0.058	80.7
	case B	$Mgr/1litH_2O = 354$			
$7.8 \times 10^{+3}$	0.020	9.23	0.190	2.43×10^{-5}	118
9.5	0.029	8.60	0.190	0.023	96.9
7.6	0.031	8.77	0.190	0.025	103
5.7	0.035	8.98	0.184	0.033	109
3.8	0.043	9.17	0.154	0.040	98.6
2.85	0.049	9.34	0.134	0.045	87.9
1.9	0.060	9.50	0.111	0.055	74.6

表7で*印を付けた場合について、時間の経過と共に変化をする濃縮度 $\epsilon\%$ と Δk の様子を説明する。 Δk の値が0以下になるまでの時間が“反応継続時間”、 ϵ は10%から始まって ^{235}U の消費が0.04秒付近で顕著になり濃縮度は最終的に9.11%に落ち込む。同じ時刻頃に Δk の値は最高値を示し、以降は急激に低下している。重要な点は、反応度付加率が広範囲に変化しても爆発力は最大でも120~80tonを超える事はなく、表6の結果とは様変わりの数値になった。即ち、目標爆発力：広島・長崎投下の原子爆弾の200~300分の1にしかならない。竹内の計算によると、臨界時の体積は37リットル、装填量で74リットルで、この全体が水であると仮定すると、全部が蒸発する熱量は46000Kcalになり、略 $K = 43$ に相当する。そして、反応が停止する $K = 51$ までのエネルギーで弾頭内部に圧力が発生する。 $K = 51$ はMarkが設定した核爆発の不発弾状態以下である。即ち、内部圧力によって弾頭が破壊されれば、その時点で連鎖反応は停止し期待される爆発力は100ton以下になる。弾頭が強い機械的強度を持っていて破壊しなければ、100tonのエネルギーを抱えたまま連鎖反応は自然に停止し、爆発する事もない。原子爆弾投下についての米軍の資料によると²⁶、長崎へ

²⁶Headquarter Twentieth Air Force, APO 234, 奥住喜重、工藤洋三、桂哲男訳；米軍資料、原爆投下報告書、東方出版(1993年9月)。

の Pu 爆弾投下のための事前訓練用として日本の各地に落とした通常化学爆薬のパンブキン弾ですら 4.5ton の爆発力を持っていた。当時の通常化学爆発の最高値は 10ton と言われているので、10 倍程度の爆発力は期待できたかもしれない。何れにせよ、「仁科芳雄の報告記録」にある「二号研究」で開発されたであろう核爆弾は失敗であったと、この計算によって結論されると著者は思っている。

4.4 高速中性子による核爆弾との物理的相違

高速中性子による原子爆弾でも爆薬の ^{235}U は同じように消費する筈である。 ^{235}U の消費がなければ、20Kton もの爆発力は発生しない。何故、高速中性子と熱中性子とで異なるのか？、という物理的説明が必要であろう。

ここで、利用する中性子のエネルギーに関係なく 2 成分の弾頭内構成を考える。一つは核爆薬で添え字を f 、核爆薬でない他の成分を o で表すと、一般的に、余剰反応度は次式：

$$\Delta k = \frac{\nu N_f \sigma_f^f}{N_f \sigma_a^f + N_o \sigma_a^o} (1 - L) - 1 \quad (4-15)$$

で示される。この式は (4-11) 式と全く等価である。ここで、断面積の下付き添え字の f は核分裂、 a は吸収を示す。 N は原子核の数で、 L は中性子の漏れの割合で $(1 - L)$ は漏れない割合になり、これは (4-11) 式第 1 項分母の逆数と等価である。弾頭内構成での他の成分は、熱中性子の場合：「二号研究」核爆弾では減速材である軽水である。高速中性子による原子爆弾では、核爆薬以外の成分は無いとも考えられるが、一般論として考慮する。実際には、例えば、U 爆弾では構造材、Pu 爆弾では添加された Ga²⁷ 等が考えられる。

連鎖反応が起これば、発生した中性子によって各成分の原子核の数は中性子を吸収して、核分裂を含む核変換を受けて減少する。その時間変化の割合は

$$dn/dt = -\sigma_a N n v \quad (4-16)$$

である。ここで、 n は弾頭内の中性子数、中性子速度は v である。これを解いて、(4-15) 式に代入すれば次の式になる。

$$\Delta k(t) = \frac{\nu N_{f0} \sigma_f^f (1 - L)}{N_{f0} \sigma_a^f + N_{o0} \sigma_a^o \exp[(\sigma_a^f - \sigma_a^o) n v t]} - 1 \quad (4-17)$$

ここで、各原子核数の添え字の 0 は初期値を示す。

高速中性子の場合には、各成分の断面積値は揃って小さく、近似的には同じ値であると考えてよい。従って、(4-17) 式から明かなように、 $\Delta k(t)$ は時間に関係なく一定値を持っていると考えてよい。一方、熱中性子の場合には、爆薬である ^{235}U の吸収断面積値は 681b で、他成分の軽水は 0.664b である（ここで、酸素の断面積値は小さいので無視した）。即ち、時間の経過と共に、(4-17) 式第 1 項の分母は大きくなって、最終的には $\Delta k(t)$ は 0 になり、連鎖反応は停止する。高速中性子の場合であっても、実際には ^{235}U の消費により核弾頭の爆薬の量は減少する。しかし、表 4 によると、正規爆発力 20Kton の場合でも ^{235}U 消費量は約 1Kg である。U 爆弾の場合の装填量は 25Kg が想定される²⁸。これから 1Kg 減少したとしても反射体付きの ^{235}U の臨界量は 16.28Kg であるから、高速中性子を利用した原子爆弾では爆発して全核爆薬が四散するまで Δk 値は保たれる。

²⁷ 原子爆弾では、爆薬として動作する以外の通常時では臨界以下にしておかねばならない。装填された Pu 金属は通常時は密度の低い状態にして未臨界性を保っている。金相学的には最低の 15.92 の密度を持つ δ 相が好ましいが、室温では δ 相は不安定で 19.86 の密度の α 相になって安定化する。そこで、室温でも δ 相で安定化させるために 3% のガリウム：Ga を添加している。

²⁸ 前掲 24.

「二号研究」の開発核爆弾の失敗は熱中性子による連鎖反応を利用した点にある。そして、この考えは ^{235}U の吸収と分裂断面積の高い値が原因である。しかし、これによって必要な臨界量は高速中性子の場合に比較して極めて少なくなる。高速中性子臨界量は天然U反射体付きで ^{235}U 16.28Kg、熱中性子による軽水反射体付きの最小臨界量は 0.76Kg (竹内の計算では 0.62Kg)、実に、約 20 分の 1 である。従って、熱中性子利用の場合には用意すべき天然U量は少なくてよい。即ち、「二号研究」では出来るだけ少ないU量で連鎖反応を実現させようとした開発戦略(原子炉を建設するならば重要)であったが、核爆弾開発では裏目に出た事になったのである。

なお、蛇足ではあるが、10%濃縮度で失敗した「二号研究」が、更に、開発研究を高濃縮度使用に向かって進めるといふ可能性があるかも知れないと思ひ、その場合の問題の検討を付録Dに示しておいた。

5 おわりに

戦時中の日本での中性子連鎖反応研究は、陸軍委託「二号研究」が理研で、海軍委託「F研究」が京都帝国大学で、各々独立に研究情報の相互の交換もなく実行された。「F研究」では積極的に創造性のある研究に挑戦する姿勢が感じられるが、実力不足で成果が得られなかった。信頼出来る学術論文が残っていない「二号研究」は堅実な計算法を駆使して手堅く研究を進めていた態度が印象に残る。しかし、「二号研究」では連鎖反応達成を比較的楽観視していたのではないかと思われる。両研究ともに後世に残るような華々しい研究業績を挙げる事なく終息した。

本論文は、「二号研究」における臨界量計算結果と、理研で考えられていた方法で目標であった原子爆弾開発が可能であったか否かの問題を解明した。これらを評価出来る程の信頼出来る学術論文は現存していないので、僅かに入手された資料の間を埋めるべく現在の原子炉初等理論を最大限に利用した。核分裂反応が発見されて時間が殆ど経過していない時期に、Perrin が提案した臨界量計算法が当時の評価法の全てで、両研究とも実効的には Perrin から一步も進展していない。著者が証明したように²⁹、Perrin の計算式から現在の原子炉初等理論の中心にある k_{∞} の四因子公式が導出出来る。更に、「二号研究」における臨界量計算結果を評価するのに、現在の原子炉初等理論の利用が可能であると考えた根拠を付録Eに述べた。

ここに H.D.Smyth 報告の 2.1 節には次の文章がある³⁰事を示したい。

…… in a conference with representative of the Navy Department in March, 1939 Fermi suggested that possibility of achieving a controllable reaction using slow neutrons or a reaction of an explosive character using fast neutrons. He pointed out, however, that the data then available might be insufficient for accurate predictions.

Fermi は早い時期に原子爆弾は熱中性子利用では成功しないと言っているようであるが、最後の however の文章は Fermi は熱中性子利用が不可である物理的理由を完全に理解していたのではない事を示している。相互の研究情報の交換が全く途絶していた同じ時期の日本の「二号研究」で原子爆弾開発の失敗に対する正確な物理的理由を予測出来なかったとしても、その理由が理研の当時の研究水準の低さによるものではないと著者は思っている。更に、「二号研究」で原子爆弾開発の失敗の物理的理由は、“原子炉は原子爆弾のような核爆発を起こさない。そして、原子爆弾は原子炉とは本質的に異なった動作原理で機能している事”を語っていると思う。

²⁹前掲 1.p.41, 付録A、A-2 節。

³⁰H.D.Smyth; *Atomic Energy for Military Purpose*, Rev.of Mod.Phys., **17**,no.4,p.351(1945).2.1,p.366.

この研究について、関連資料を提供下され、且つ、有用なご助言を戴いた山崎正勝教授に謝意を表
したいと思います。

付録 A 均質 U_3O_8 軽水減速反応系の等価臨界半径の実験値

U_3O_8 は水には溶けない。従って、 U_3O_8 と軽水の均質混合の反応体系での実験は不可能で、過去にも実測値の発表は無い。しかし、竹内が計算した体系に近い ^{235}U 濃縮度を持った球形均質炉の実測値が、H.C.Paxton, N.L.Pruvost によって編集されている³¹。ここでは、竹内の計算体系の内、5%と30%濃縮度の場合のみを比較の対象に選んだ。参照にした実測値は下記の通りである。

- (i) 4.89% U_3O_8 と有機化合物 sterotex (日本名 トリステアリン) の均質混合系
- (ii) 4.98% UO_2F_2 化合物の水溶液
- (iii) 30.3% UO_2F_2 化合物の水溶液
- (iv) 30.45% UO_2F_2 化合物の水溶液

たまたま、5%と30%濃縮度に近い体系の実測値があったので、これらの結果を選んだ。(iii) のデータは円柱形での実験であったが、Paxton-Pruvost が球形の値に変換した結果である。又、(iv) 以外は軽水反射体が付いた値も掲載されている。全ての実測値は、 N_H/N_{235} を変数として臨界体積が与えられている。従って、この臨界体積値から実測臨界半径を求める。そこで、竹内の計算臨界半径との比較のためには次の手順が必要である。

(1) 竹内の臨界半径の計算値は外挿距離を含んでいるが、実測臨界半径値は実験された球体そのものの半径であるから、実測値に外挿距離を加える必要がある。Paxton-Pruvost の報告書には、 UO_2F_2 の水溶液についての外挿距離の値 cm は下表のように与えられているが、 U_3O_8 -sterotex 系については無いので、両系での輸送断面積を計算で求めて、その比で補正する。

N_H/N_{235}	50	200	500	1000
UO_2F_2 水溶液	5.8	5.4	5.2	5.2
U_3O_8 -sterotex	11.0	7.8	6.4	5.9

(2) (i)~(iv) に示した体系の値を竹内の U_3O_8 -軽水系の相当する値に変換する必要があり、その方法として現在の原子炉初等理論を用いる。臨界条件では、

$$\frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} = 1 \quad (A-1)$$

が成立する。ここで、 k_{∞} は無限増倍率、 M^2 は移動面積で、減速面積 τ と拡散面積 L^2 の和で与えられる。又、 B はバックリングで、球形臨界系では外挿距離を含んだ臨界半径 R から次のようになる。

$$B = \frac{\pi}{R} \quad (A-2)$$

従って、(A-1) 式は (A-3) 式ようになる。

$$\left(\frac{\pi}{R}\right)^2 = \frac{k_{\infty} - 1}{M^2} \quad (A-3)$$

一般に、 k_{∞} も M^2 も体系を構成する物質の核的特性によって決定されるから、(i)~(iv) の体系の値を基準とした U_3O_8 -軽水系の相当する臨界半径値 R' への変更は

$$\frac{dR}{R} = \frac{\partial R}{R} \Big|_{const.M} + \frac{\partial R}{R} \Big|_{const.k_{\infty}} \quad (A-4)$$

の計算方法によって、

$$R' = R + \Delta R \quad (A-5)$$

³¹ 前掲 11.

与えられる。具体的な ΔR に対する計算式は (A-6) 式で示せる。

$$\frac{dR}{R} = -\frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{M^2} \left(\frac{R}{\pi} \right)^2 \right] \left[\frac{\Delta k_{\infty}}{k_{\infty}} + \frac{\Delta M}{M} \right] \quad (\text{A-6})$$

(A-6) 式の ΔM と Δk_{∞} は、各々、(i)~(iv) の体系での値と U_3O_8 -軽水系での値との差である。

(3) 減速材としての H_2O の核定数はよく知られているように、

$$\tau = 30.2 \text{ cm}^2 \quad L_0^2 = 8.12 \text{ cm}^2 \quad (\text{A-7})$$

であるが、sterotex についての核定数の測定や評価値はない。sterotex は融点 $55 \sim 72 \text{ }^\circ\text{C}$ 、密度 0.862 g/cm^3 、化学式 $C_{57}H_{110}O_6$ の物質である。まず、 τ については、 H_2O と測定値のある acenaphthene $C_{12}H_{10}$ の値より、次のように内挿する。 H atom/全 atom の値を用いると 37.8 cm^2 になり、 $\langle \xi \rangle$ を用いると 35.9 cm^2 になる。そこで、平均を採って 37 cm^2 の値を採用する事にする。この手順を下表に示した。

物質	H atom/全 atom	$\langle \xi \rangle$	$\tau \text{ cm}^2$
$C_{12}H_{10}$	0.455	0.818	54.2
$C_{57}H_{110}O_6$	0.601	0.901	? \Rightarrow 37
H_2O	0.667	0.926	30.4

次に、 L_0^2 については、次のように考える事にする。 H_2O の D/Σ_a を計算すると、(A-7) 式と異なり 10 cm^2 になり、sterotex の D/Σ_a は 10.45 cm^2 になるので、1.045 の比が得られる。この比を (A-7) 式の H_2O の L_0^2 値に用いる。最終的に、sterotex の核定数は次のように与えられる。

$$\tau = 37 \text{ cm}^2 \quad L_0^2 = 8.47 \text{ cm}^2 \quad (\text{A-8})$$

又、 UO_2F_2 や U_3O_8 を減速材に混合した場合に、 U は高速中性子に対して非弾性散乱反応があるので、その減速効果を H と同程度と近似的に考える事が出来る³²。そこで、 M^2 を熱中性子利用率 f によって次のように与える。

$$M^2 = \tau + L_0^2(1-f) \quad (\text{A-9})$$

(4) 測定は、幾つかの N_H/N_{235} の値に対して無反射体と反射体付きの臨界体積を与えている。これらの測定値から無反射体の臨界半径 R と反射体付きの臨界半径 Rr が得られる。そこで、反射体による節約 δ は

$$\delta = (R+d) - Rr \quad (\text{A-10})$$

となる。ここで、 d は (1) で検討した外挿距離である。なお、(iv) の場合は反射体付きの臨界体積の測定値がないので、 δ 値は (iii) の場合の測定値から N_H/N_{235} による内挿計算をした。

付録 B 連鎖反応系の中性子寿命と原子炉暴走実験の例

§B-1 連鎖反応系の中性子寿命 (中性子サイクル時間) 値の実例

中性子寿命 (中性子サイクル時間) 値の実例は IAEA の directory に記載されている³³。数十基の軽水減速炉について調査をしたが、その全部を示すのは意味がないので、主要な例について挙げ

³²J.R.Lamarsh; *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Publishing co., Mass. (1974). 武田充司、仁科浩二郎訳; 原子炉の初等理論 (上), p.289, 吉岡書店 (1974 年).

³³IAEA; *Directory of Nuclear Reactor*, Vienna (1959~1971).

る。単位は 10^{-4} 秒。

PWR :Belgian Thermal Reactor BR-3	0.28
Shippingport Atomic Power Station	0.56
Yankee Atomic Electric Co.	0.25
BWR :EBWR	0.74
Vallecitos BWR	0.5
Humbaldy Bay	0.39
Big Rock Point	0.4
JPDR	0.5
Test Reactor: Borax I	0.65
Borax II	0.75
Borax III	0.67
High Flux Reactor	0.73
SPERT I	0.5
Aqueous Homogenous Reactor: Low Power Water Boiler	1.4
High Power Water Boiler	1.0
Super Power Water Boiler	0.75

§B-2 原子炉暴走・破壊実験について³⁴

米国では、1954年頃から高濃縮 $^{235}\text{U}-\text{Al}$ 合金燃料の軽水減速炉を核暴走・破壊する実験が National Reactor Testing Station, Idaho Falls にて実施された。Borax I(Boiling Reactor Experiment-I) と SPERT I(Special Power Excursion Reactor-I) の原子炉が実験対象になった。そして、1961年1月に反応度事故で破壊された極地用の電源のために開発中であった小型炉 SL-1(Stationary Low Power Plant-1) の記録も検討対象になる。ここでは、Borax Iの結果を以下に述べる。

○ Borax I等の主な構造

● 炉心

18枚の UAl 合金板からなる29本の燃料要素(138.6grの ^{235}U を含む)を四角断面に並べた $49.5\text{cm} \times 49.5\text{cm} \times 60\text{cm}$ 高さの炉心。合金板の間に冷却機能を兼用している減速材である軽水が満たされている。反応を制御する制御板の操作は上部から炉心に挿入する。

● 原子炉容器

炉心と制御板等を収納している鋼製の容器。直径 120cm × 高さ 400cm × 厚さ 1.27cm 。SPERT Iは直径 120cm × 高さ 460cm × 厚さ 1.27cm 。SL-1は直径 140cm × 高さ 440cm × 厚さ 1.9cm 。

● 遮蔽体付き格納容器

原子炉容器やポンプ等の補助機器を収納する。原子炉容器を直接収納するタンクの直径は 3m である。

○ 反応度の印加

4%の反応度値を持つ制御板を0.2秒で引き抜こうとした。しかし、80%しか抜けなかった。従って、印加反応度は3.3%、速度は $0.165\Delta k/s$ 。SPERT Iの反応度値は3.2%。SL-1の反応度値は3.8%。

○ 破壊過程

Borax Iでは、0.003秒閃光が走り、続いて、遮蔽体付き格納容器上部に破壊されて飛ばされた炉内構造物が見えた。炉出力は0.048秒後に19000MWに、 UAl 合金板の温度は 1800°C に達し、

³⁴1955 Geneva Conf., P/481(1955), 1958 Geneva Conf., P/2428(1958); 1965 Geneva Conf., P/283 (1965).

殆ど溶解した。高温の溶解金属は炉水に接触して水蒸気爆発が生じた。この時、金属-水の化学反応が起こり、このエネルギーが爆発力に加わった。炉水が蒸発すると同時に反応度が低下し、連鎖反応は停止した。炉内に設置した圧力計も破壊されたが、推定圧力は $420\sim 700\text{Kg/cm}^2$ に達した。原子炉容器は破裂し、制御板、破損した UAl 燃料等は大気中に放出され、それらの破片は最大 6Km 遠方に達している。約 1ton の制御板駆動装置は 15m も空中に放り出され炉の近くに落ちていた。格納容器内の補助機器は周囲に飛散していたが、大部分は除染後再利用された。爆発の規模は化学爆発としても中規模程度である。Co 箔による測定では発生核エネルギーは 135MWs であった。

SL-1 の事故では、最高炉出力は約 19000MW で燃料の最高温度は $2075\text{ }^\circ\text{C}$ 以上になり、金属-水の化学反応熱を含めた水蒸気爆発が生じた。発生圧力は 700Kg/cm^2 、発生核エネルギーは 133MWs に達し、炉心は完全に破壊されたが、原子炉容器は膨らむという変形のみを受けた。

SPERT I D-12/25 炉心では、最高出力は 2250MW 、燃料最高温度は $1360\text{ }^\circ\text{C}$ に達し、約 3.5MWs の金属-水の化学反応熱を含めた水蒸気爆発で 280Kg/cm^2 以下の圧力が生じた。発生核エネルギーは 31MWs で、炉心は約 35% が溶解し、原子炉容器は膨らむという変形を受けた。

SPERT I の酸化燃料の場合では、最高出力は 35000MW 、燃料最高温度は $1800\text{ }^\circ\text{C}$ 、発生核エネルギーは 155MWs に達したが、圧力は 9Kg/cm^2 にしか上昇せず、2本の燃料のみが破損し、全燃料の 25% が変形したに過ぎなかった。これは燃料が酸化物のために Doppler 効果が働いて炉心の持つ反応度を抑えた結果である。

付録 C 核爆薬の消耗に伴う余剰反応度の計算法

核爆薬の核分裂による消耗に伴って核弾頭の持つ余剰反応度 Δk も変化する筈である。この時間変化を $\Delta k(t)$ とすれば、本文の (4-4) 式の $K(t)$ は

$$K(t) = \frac{1}{\ell} \int_0^t \Delta k(t') dt' \quad (\text{C-1})$$

である。 Δk が時間的に任意変化をする場合には、最終時刻を t_N として

$$K(t_N) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\ell} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \Delta k(t) dt = \sum_{i=1}^N (K_i + K_{i-1}) \quad (\text{C-2})$$

ここで、

$$K_i = \frac{\Delta t}{2\ell} \Delta k(t_i) : \Delta t = t_i - t_{i-1} \quad (\text{C-3})$$

又、 $K_0 = 0$ とする。これは $\Delta k(0) = 0$ に相当する。 Pu 爆弾では、核弾頭が臨界になる時刻と連鎖反応が開始される時刻とは一致させない。核弾頭の Δk がなるべく大きくなった時刻に連鎖反応を開始させる方が核弾頭内で核分裂が起こる割合が大きくなり、爆発力が増加するからである。特に、 Pu 爆弾では必然的に含まれてしまう ^{240}Pu の自発核分裂反応による中性子発生により連鎖反応が予期せぬ時刻に開始してしまう事を出来る限り避ける事が必要である。この必要性が爆縮技術の開発になった。しかし、ここでは初めから体系内に中性子源が設置されていると考える方が妥当であろう。任意の時刻での $\Delta k(t)$ は、初等原子炉理論に従って本文の (4-11) 式で与えられる。

$$\Delta k(t) = \frac{p\eta(t)f(t)}{1 + M^2(t)B^2(t)} - 1 \quad (\text{C-4})$$

ここでは、 ^{238}U の原子核数は時間に無関係と仮定する。これは十分に理由のある近似である。具体的には、共鳴を逃れる確率 p は一定であるとする。そして、上の式第 1 項の分子は k_{∞} である

が、これは臨界状態の B_c と M^2 によって与えられて (即ち、 $1+B_c^2 M^2$) いなければならないが、後に示す k_∞ とは一致しない。それは、本文第3章に検討したように、竹内の計算では臨界半径を楽観的に求めた結果から来ている。そこで、ここでは竹内の計算結果に合わせるように k_∞ 値を補正する。この $M^2(t)$ は付録Aの (A-9) 式で計算される。(C-4) 式の $\eta(t)$ と $f(t)$ は濃縮度 $\varepsilon(t)$ の関数として示される。

$$\Sigma_a(t)\eta(t)f(t) = \nu\sigma_f^{235} \quad (C-5)$$

$$\Sigma_a(t)f(t) = \sigma_a^{235} + \sigma_a^{238}[1 - \varepsilon(t)]/\varepsilon(t) \quad (C-6)$$

$$\Sigma_a(t) = \Sigma_a(t)f(t) + [8/3\varepsilon(t)]\sigma_a^0 + X_a(t) + (N_H/N_{235})(\sigma_a^H + \sigma_a^0/2) \quad (C-7)$$

そして、核爆薬 U_3O_8 での $\varepsilon(t)$ は次式で与えられる。

$$\varepsilon(t) = \frac{842/3}{3 + N_0/U(t)} \quad (C-8)$$

ここで、 N_0 はアボガドロ数で、 $U(t)$ は時刻 t での U_3O_8 に含まれる ^{235}U の量である。そして、 Δt が十分に小さければ近似的に次式で計算される。

$$U(t) = U(0) - \Delta F(t - \Delta t) \quad (C-9)$$

ここで、 $\Delta F(t)$ は装填した U_3O_8 の量のうち、核分裂反応で消費した ^{235}U の量である。又、(C-7) 式の $X_a(t)$ は核分裂反応の結果で生成した核分裂生成物の内、一番熱中性子吸収断面積の大きい $^{135}Xe(3.5 \times 10^6 b)$ による中性子吸収率である。

$$X_a(t) = 1.05 \times 10^{-20} F(t) \quad (C-10)$$

ここでは、核分裂反応で直接生成する ^{135}Xe の生成率 0.003 のみを考慮する。(C-7) 式のバックリング $B(t)$ の時間的変化は Los Alamos Primer と同様に³⁵、球形体系の半径 $R(t)$ が臨界半径 R_c から時間的に線形変化すると仮定する。即ち、 $t = t_0$ で、半径が臨界量の2倍の装荷量に相当する値になるという線形変化を仮定する。結果は次式のようなになる。

$$R(t) = R_c(1 + 0.26t/t_0) \quad (C-11)$$

本文の表5に示したように、竹内の計算結果の例について最大可能な Δk_{max} が得られているので、 t_0 値を設定すると核弾頭への反応度付加の時間的割合が決定される。そして、時間を追って (C-4) 式を計算し、 $t = t_0$ になれば、その時刻以降は $R(t_0) = 1.26R_c$: 一定として、(C-4) 式の Δk が0になるまで計算し続ける (但し、実際には 0.001 以下にて計算は打ち切られる)。注意すべきは、時間的反應度付加率は予め $\Delta k_{max}/t_0$ として設定するが、実際の計算での Δk の最高値が予め与えた Δk_{max} になるとは限らない点である。それは、その時刻での濃縮度が核分裂反応の進行に伴って初期の濃縮度より低下するからである。

³⁵ 前掲 19.

付録D 蛇足…高濃縮の場合の検討

本来、歴史には“i f”はないと言われている。「二号研究」開発の10%濃縮度の核爆弾は失敗であった事を本文で述べた。通常は、失敗が判明した時点で研究組織は次の手段を考える筈である。「二号研究」は極めて初期の段階で終了したので、ここで検討しようと考えた場面は歴史の資料には絶対に現れない事実である。著者はむしろ原子炉物理の専門家として、この失敗が判明した次の道として、100%濃縮度の核爆弾の開発に進むのではないかと想像した。その根拠は竹内の資料に100%濃縮度の臨界性の計算結果が掲載されているからである。本文の表5に示したように100%濃縮度の Δk_{max} が他の場合に比べて高いので、目標爆発力に対して、どの位近い結果が得られるのかという物理的興味があつた。

更に、Weartの論文に³⁶次のような記述があるのも気になる点である。

Evidence I have seen through the courtesy of Charles Weiner suggests that the Japanese suspected that a nuclear bomb, if it could be built at all, would be something like an extremely compact and highly overcritical reactor. Such a reactor might be built, for example, by using uranium heavily enriched in the isotope uranium-235.

この論文から Weart も Weiner も“i f”の領域に踏み込んでしまったのではないかと考え、彼らも100%濃縮度の熱中性子利用の核爆弾特性に興味を持っていると判断して、著者は蛇足である事を承知の上で、この付録に検討結果を述べた。具体的には、「二号研究」開発で検討に進んだかも知れない100%濃縮度の核爆弾の特性を、表7と全く同じ設定条件で計算して結果を表Dに掲げた。

表Dより明かになった点は、「二号研究」の開発で100%濃縮度のような限界でも、なお、目標の20Ktonの爆発力の原子爆弾は作れないという事である。150ton爆弾は10%濃縮度の爆弾よりも爆発力は約1.5倍大きくなり、正規値の1/150の程度である。しかし、これは熱中性子を利用するという「二号研究」の考え方では目標に到達するのは本質的に不可能であった事を示している。

表D 「二号研究」で100%濃縮度核爆弾の予想特性

Δk 付加率 $\Delta k/s$	反応継続 時間 秒	²³⁵ U の 減少率 %	最高 Δk	その時間 秒	爆発力 TNT ton
case A		$Mgr/1litH_2O = 40$			
7.8×10^3	0.012	89.9	0.269	3.46×10^{-5}	157
13.5	0.022	80.7	0.267	0.020	131
10.8	0.024	82.6	0.240	0.022	130
8.1	0.028	85.8	0.210	0.026	117
5.4	0.034	89.5	0.173	0.031	99.4
4.05	0.039	91.2	0.150	0.036	88.6
2.7	0.047	93.6	0.123	0.044	74.9
case B		$Mgr/1litH_2O = 47$			
7.8×10^3	0.011	90.8	0.268	3.46×10^{-5}	154
13.5	0.020	81.6	0.251	0.019	132
10.8	0.023	83.8	0.226	0.021	122
8.1	0.026	86.8	0.197	0.024	109
5.4	0.032	89.9	0.163	0.029	92.5
4.05	0.036	92.2	0.141	0.034	81.9
2.7	0.044	94.5	0.116	0.041	68.9

³⁶前掲 16.

付録E Perrin の計算式と原子炉初等理論との接点

本文 (3-5) 式から出発する事にする。著者が以前に述べたように³⁷、この式の中性子の発生項は原子炉初等理論によって、

$$n(\nu_0 p - 1)S_a \Rightarrow n\nu_0 p S_f - nS_a \quad (\text{E-1})$$

と書き変えた方がよい。その上、(3-5) 式を時間依存の式として書くと、

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\lambda}{3} \Delta v F + \left[n\nu_0 p S_f - (nS_a + \sum_i n_i S_{a_i}) \right] v F \quad (\text{E-2})$$

となる。上式の右辺最後の項は体系の持つ全吸収断面積： Σ_a に相当する。ここで、中性子束： $\Phi(t, r)$ を導入する。

$$\Phi(t, r) = v F \quad (\text{E-3})$$

(E-2) 式を (E-3) 式によって書き変えると次式になる。

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\lambda}{3} \Delta \Phi + (n\nu_0 p S_f - \Sigma_a) \Phi \quad (\text{E-4})$$

更に、 $\Phi(t, r)$ を時間のみに依存する関数： $\phi(t)$ と空間のみに依存する関数： $\psi(r)$ の積に変数分離出来ると仮定する。

$$\Phi(t, r) = \phi(t) \cdot \psi(r) \quad (\text{E-5})$$

これは“一点近似法”と呼ばれている。体系内の中性子束空間分布が時間的には変化しない、例えば、時間の変化に対して中性子束は空間的に平均値で代表出来ると考えている事に相当する。これを (E-4) 式に代入して整理すると、

$$\frac{1}{v} \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\lambda}{3} \frac{\Delta \psi(r)}{\psi(r)} + n\nu_0 p S_f - \Sigma_a \quad (\text{E-6})$$

となり、原子炉初等理論で用いられているバックリング： B

$$\Delta \psi(r) + B^2 \psi(r) = 0 \quad (\text{E-7})$$

を導入すると、

$$\frac{1}{v} \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{-\lambda}{3} B^2 + n\nu_0 p S_f - \Sigma_a$$

半径： R を持った球形体系では、(E-7) 式を、中心で、 $\psi(0)$ は有限値を持ち、 R で、 $\psi(R) = 0$ という境界条件で解いて、 $B = \pi/R$ という結果を得る。更に、上式を整理すると次式が得られる。

$$\frac{1}{\Sigma_a v} \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{n\nu_0 p S_f}{\Sigma_a} - \left(1 + \frac{\lambda}{3\Sigma_a} B^2 \right) \quad (\text{E-8})$$

ここで、原子炉初等理論での定義に従うと、

$$k_{\infty} = \frac{\nu_0 p n S_f}{\Sigma_a} \quad (\text{E-9})$$

又、中性子サイクル時間を l とすると、

$$1/l = \Sigma_a v \left(1 + \frac{\lambda}{3\Sigma_a} B^2 \right) \quad (\text{E-10})$$

³⁷前掲 1.p.29~30.

故に、(E-8) 式は次式のようになる。

$$\ell \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{k_{\infty}}{(1+B^2\lambda/3\Sigma_a)} - 1 \quad (\text{E-11})$$

次に、本文 (3-7) 式の λ を近似化する。まず、 $p \doteq 1$ と近似する。(3-7) 式の括弧内の第 2 項は $(\lambda_f \Delta v_f F/3)/(\lambda_t \Delta v F/3)$ と書け、この分子は高速中性子の体系からの漏れ、分母は熱中性子の体系からの漏れであるから、Fermi の連続減速モデルによる原子炉初等理論では、

$$\text{分子は、} 1 - e^{-B^2\tau} \doteq B^2\tau$$

$$\text{分母は、} 1 - \frac{1}{1+L^2B^2} \doteq B^2L^2$$

これらの式中の B は (E-7) 式を解いて得られたバックリングである。従って、

$$\frac{\lambda_t}{3\Sigma_a} \left(1 + \frac{\tau}{L^2}\right) = L^2 \left(1 + \frac{\tau}{L^2}\right) = M^2 \quad (\text{E-12})$$

ここでは、勿論、 $(\lambda_t/3)/\Sigma_a = D/\Sigma_a = L^2$ の定義を用いた。そこで、(E-11) 式は次の (E-13) 式となる。

$$\ell \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{k_{\infty}}{1+M^2B^2} - 1 = \Delta k \quad (\text{E-13})$$

上式の右辺は、本文の (4-11) 式、(4-15) 式、付録 C の (C-4) 式である。更に、右辺も (E-3) 式と (E-5) 式によって、

$$\ell \frac{1}{\phi(t)\psi(r)} \frac{d\phi(t)\psi(r)}{dt} = \ell \frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dt} = \ell \frac{1}{F} \frac{dF}{dt}$$

であるから、最終的に (E-13) 式は本文の (4-2) 式になる。

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\Delta k}{\ell} F \quad (\text{E-14})$$

(E-10) 式も近似的には

$$\ell = 1/(v\Sigma_a) \quad (\text{E-15})$$

になる。しかし、このような拡散理論を基にせず、衝突確率法を基にした中性子平衡関係からは (E-15) 式の方がよい事を著者が示した³⁸。

³⁸ 深井佑造； Δk に対する計算式について、日本原子力学会誌、12,989(1996)。

理研の「原子爆弾」 一つの幻想－「完全燃焼」構想－

山崎正勝

1 はじめに

理化学研究所の仁科芳雄は、東京第二陸軍造兵廠への報告の中で、遅い中性子反応を利用した「爆弾」に言及し、それが「不得策」であると述べた。その理由の第1は、10%濃縮ウラン10kgと想定された臨界量に対して、「爆弾」にはその2倍のウランを必要とし資源的損失が大きいこと、第2は、反応を持続させるために強力な覆い（「ボンブ」。おそらく鋼鉄製の強固なものであろう）を必要とするため、爆弾がきわめて重くなることであった¹。この記述全体は、仁科が技術的な理由から、爆弾に消極的であったことを明瞭に示す資料の中で重要な部分である。

しかし、特に第2の理由の説明として書かれていることがら、すなわち「爆発威力大ナル成分温度トナス為ニハ1/20乃至1/30秒ノ時間ヲ要ス」という部分は、そのままでは理解が困難である²。仁科たちが構想した軽水を減速材として使用するような遅い中性子反応系では、原子核分裂で発生した中性子が体系内で次の核分裂を起こすまでの時間はおよそ 10^{-4} 秒であるので、暴走状態となった場合に予想される体系の反応持続時間は、せいぜい 10^{-3} 秒程度と考えられる。仁科の数字は、この予想と比べて100倍近く長い³。なぜ、そのような大きな反応持続時間を想定したのだろうか。

この謎を解く重要な一つの鍵は、2節で示すように、戦後の比較的早い段階で安田武雄が書いた記事の中に発見される。安田は、理化学研究所の核研究を支援した陸軍航空本部の本部長を務めた人物である。彼はその記事の中で、理研の物理学者たちが、彼らの体系でウラン235（厳密には、2節に示すように、臨界量に付加されたウラン235）がすべて完全に反応することを想定し、広島、長崎原爆規模の威力を予想していた事実を述べている。仁科の上記の長い反応持続時間は、それが反応を完全に終えるまでの時間であった可能性がある。

筆者はこのことを確かめるために、3、4節で竹内柁の実験ノートに示された臨界量の計算結果を再現し、理研の物理学者が用いた原子核のデータを推定した。そしてそれらに基づいて彼らの体系から放出されるエネルギーと、反応が終了するまでの時間を求めた。その結果、上記の推定がほぼ妥当であるという結論を得ることができた。

2 「完全燃焼」を示唆する安田武雄の記事

陸軍航空本部長として第二次世界大戦中に日本の核兵器研究開発の指揮を執った安田武雄は、1955年に「日本における原子爆弾製造に関する研究の回顧」と題する記事を発刊まもない『原子力工業』

¹仁科芳雄の東京第二陸軍造兵廠への報告、5頁。『技術文化論叢』no. 2 (1999) 45頁。

²同上。

³より正確な記述は、本号の深井論文参照。深井佑造『技術文化論叢』no. 3 (2000) 1頁。

誌に寄せた⁴。この原文は戦後のもっとも早い時期に書かれたものの一つである。安田によると、記事の本文は、安田の部下で理研との対応に当たった鈴木辰三郎によって「戦争直後、早々の際、起草」され、公表にあたって安田は人名を英字の頭文字に改めたという。

この記事では、昭和 18 年 6 月頃に理化学研究所から出されたとされる「判定」について、次のように記述されている。

1. ウラニウム原子核分裂によるエネルギー利用の可能性は多分にあり、
2. 原子核分裂によるエネルギーを利用する為には 1 回分として最小限 U235 を 10% に濃縮せるウラニウム約 10Kg を必要とす (この最小量より得られるエネルギーは黄色薬約 18000 トンの爆発に相当す)。
3. 銅は弗素に対し 400°C においてほぼ安定なるも弗化ウラニウムに対して実験を行い検討を要す。

ここで特に注目されるのは、第 2 項である。黄色薬 18000 トン (TNT 換算 20 キロトンに相当⁵) は、ちょうど 1kg のウラン 235 が核分裂した時のエネルギーに相当する。したがってここでの記述は、10% 濃縮ウラン 10kg に含まれる 1kg のウラン 235 が、ほとんどすべて核分裂を引き起こすという内容になっている。このことは理研の物理学者が、彼らのシステムで 1kg のウラン 235 が完全燃焼できる可能性があると考えていたことを示している。

似たような記述は、鈴木辰三郎の他の文章にも見られなかったわけではない。例えば、代表的なものとして『昭和史の天皇』には、

1. 技術的に原爆の可能性を検討した結果、原爆製造は可能と考えられる。
2. 天然ウラニウムの中に含まれている同位元素ウラニウム 235 を 1kg 濃縮分離することによって、黄色火薬 (ピクリン酸) 一万八千トンの爆発力を持つ爆弾が得られる。
3. ウラニウム 235 を濃縮分離するには六フッ化ウランを製造して、熱拡散法による方法が最良である。このための分離筒は金メッキまたは白金メッキを施せばよいが、銅を使用できるかどうかは、さらに研究してみなければわからない。

という記述がある⁶。しかし、この記述では、『原子力工業』のものとは違って、「黄色火薬 18000 トン」のエネルギーが、「濃縮分離されたウラン 235」の 1kg から生じるとされているだけで、理研の「爆弾」、すなわち濃縮度 10% のウラン 10kg を臨界量とするシステムとは結びついていない。そのため従来は、この部分の記述は、「爆弾」に関する特別な技術的な情報を含むものではなく、一つの核の核分裂による放出エネルギーに、1kg 中の原子数を掛け合わせただけのもの、あるいは仮に 100% のウラン 235 が 1kg 得られたとしたら、そこから核分裂のよって生じるエネルギーは黄色火薬 18,000 トンに相当するという形に読まれてきたのである。しかし、安田の記事は、このような従来の理解が誤っていたことを示している。

上に示したことは、じつはそのままでは、物理的な内容から見て、仁科の東京第二陸軍造兵廠への報告の他の個所と矛盾する。10% 濃縮のウラン 10kg というのは、もともと臨界量に相当するので、それだけでは通常の方法で含まれるウラン 235 を完全に反応させることはできない。反応は臨界状態を体系が超えた時にはじめて発生し、反応が進んで臨界条件が破られれば、反応そのものが停止する。やや乱暴な単純化をすれば、反応するのは臨界を超えた部分である。仁科も報告の中で「一〇 K(g) 二追加セル U ノミガ実際ノ働 (外界ニ作用スル「エネルギー」) トナル」と述べている⁷。上

⁴安田武雄『原子力工業』1955 年 7 月号。

⁵前出 3、7 頁。

⁶読売新聞社編『昭和史の天皇 4』読売新聞社 1968 年 83 頁。

⁷前出 1、4 頁。

述のように、仁科は「爆弾」に臨界量の2倍の量のウランを使用する予定であった。このことを考慮すると、上に示した発言は、臨界量そのものではなく、それに対し付加的に加えられることになっていた、同量の10%濃縮のウラン10kgに対して言われたものと解釈しなければならない。そうでなければ、仁科は臨界という概念そのものを理解していなかったと判断せざるをえないが、それは余りにも現実離れた想定であろう。したがって正確には、ここで言う「完全燃焼」とは、エネルギー効率50%程度ということである。

3 理研の物理学者の理論的基礎としてのペラン論文

当時の理化学研究所の物理学者たちの研究の内容を再現するためには、彼らがどのような理論を基礎に置いていたかを明らかにする必要がある。竹内桁の実験ノートに示されているように、それは Francis Perrin の 1939 年の論文であった⁸。Perrin は、この年に二つの重要な論文を発表している。第一の論文は速い中性子に対する天然ウラン内の連鎖反応を扱ったもので、簡単な拡散方程式が用いられた。この論文は、はじめて臨界量の概念が導入されたことで知られている⁹。第二の論文は、中性子の減速を考慮したもので、速い中性子と減速を受けた遅い中性子のそれぞれに対して密度関数 F_1, F_2 を用意し、次のような二つの拡散方程式が導入された¹⁰。

$$\begin{aligned}\Delta F_1 + c_1 F_1 + c_2 F_2 &= 0, \\ \Delta F_2 + c_3 F_1 - c_4 F_2 &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

それぞれの係数は、次のように与えられる。

$$\begin{aligned}c_1 &= \frac{3}{\lambda_1} [(\nu_1 - 1)n_U \sigma_{U1}^f - \sum_i n_i \sigma_{i1}^a] - \frac{3}{\lambda_1} n_H \sigma_{H1}^a, \\ c_2 &= \frac{3}{\lambda_1} \nu_2 n_U \sigma_{U2}^f \frac{v_2}{v_1}, \\ c_3 &= \frac{3}{\lambda_2} p n_H \sigma_{H1}^a \frac{v_1}{v_2}, \\ c_4 &= \frac{3}{\lambda_2} [n_U (\sigma_{U2}^f + \sigma_{U2}^a) + n_H \sigma_{H2}^a + \sum_i n_i \sigma_{i2}^a].\end{aligned}\tag{2}$$

ここで添え字の 1, 2 は、それぞれ速い中性子、遅い中性子に対する量を表し、 λ, v はそれぞれ中性子の平均自由行程、平均速度である。また、 n_U, n_H, n_i は、それぞれウランと水素、およびその他の元素の原子核の単位体積当たりの数、 σ_U^f は、中性子に対するウランの核分裂断面積、 $\sigma_U^a, \sigma_H^a, \sigma_i^a$ は、それぞれウラン、水素およびその他の核の吸収断面積を表す。 ν, p は、それぞれウランの核分裂後に放出される中性子数と速い中性子がウラン 238 の吸収を免れて遅い中性子となる確率である。(2) 式は今日の 2 群理論の初等的なものである¹¹。これらの式から Perrin は、 λ_2 が λ_1 に対して無視できるという条件から、臨界半径 R_c を次のように求めている。

$$R_c = \frac{\pi}{a_c},$$

⁸ 日本科学史学会編『日本化学技術史体系』第 13 巻・物理科学、第一法規出版 1970 年 第 10 章第 2 節。

⁹ Francis Perrin, *Comptes rendus*, 208 (1939) 1394.

¹⁰ Francis Perrin, *ibid.*, 1573. ただし、使用している記号などは、以下の議論の都合上、変えてある。

¹¹ 武田充司、仁科浩二郎訳、ラーマンシュ『原子炉の初等理論』吉岡書店、1974 年、下巻 490 頁。

$$a_c^2 = c_1 + \frac{c_2 c_3}{c_4} = \frac{3}{\lambda_1} \left[(\nu_1 - 1) n_U \sigma_{U1}^f - \sum_i n_i \sigma_{i1}^a \right. \\ \left. + n_H \sigma_{H1}^a \left(\frac{\nu_2 p n_U \sigma_{U2}^f}{n_U (\sigma_{U2}^f + \sigma_{U2}^a) + n_H \sigma_{H2}^a + \sum_i n_i \sigma_{i2}^a} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

前号の深井論文がはじめて明らかにしたように、これは後に京都帝国大学の荒勝文策が、彼の研究の出発点としたものである¹²。理研の場合、理論的な検討は玉木英彦を中心に行われたことが知られている¹³。残念ながらその詳細は明らかにされていないが、内容的にこの式が彼らにとって検討の出発点であったことは疑いえない。

臨界を超えた場合は、上の方程式から時間的に発展する方程式が得られる。これは Perrin の論文の中には明示されていないが、導出はきわめて自然で容易なものである。

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1 v_1}{3} [\Delta F_1 + c_1 F_1 + c_2 F_2], \\ \frac{\partial F_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2 v_2}{3} [\Delta F_2 + c_3 F_1 - c_4 F_2]. \quad (4)$$

速い中性子の密度と遅い中性子の密度は、それぞれ独立の時間発展を取ることができるが、減速のメカニズムが順調に推移し、二つの中性子の成分のそれぞれの収支がうまくバランスして時間成長をとげる場合を考え、二つの中性子密度の時間発展が等しいとし、

$$F_1 = e^{\frac{t}{\tau}} f_1, \quad F_2 = e^{\frac{t}{\tau}} f_2 \quad (5)$$

と置くと、(3) 式を導いた時と同じ近似の下で、体系の半径 R と τ とを結びつける次のような式が求められる。

$$R = \frac{\pi}{a}, \quad a^2 = c_1 - \frac{3}{\lambda_1 v_1} \frac{1}{\tau} + \frac{c_2 c_3}{c_4 + \frac{3}{\lambda_2 v_2} \frac{1}{\tau}}. \quad (6)$$

ここから

$$|c_1| \gg \frac{3}{\lambda_1 v_1} \frac{1}{\tau}, \quad (7)$$

という近似の下で、次のような時間発展の係数が得られる。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\lambda_2 v_2}{3} c_4 \left[\frac{k_\infty}{1 + \left(\frac{R_c}{R}\right)^2 (k_\infty - 1)} - 1 \right]. \quad (8)$$

ここで k_∞ は次のように与えられる無限大体系での中性子増殖係数である。

$$k_\infty = -\frac{c_2 c_3}{c_1 c_4}. \quad (9)$$

もし、必要な断面積などのデータが得られれば、(8) 式から中性子密度の時間的な発展を求めることができる。

¹²清水栄京都大学名誉教授保管資料「U 核分裂ノ連鎖反應」および深井佑造『技術文化論叢』no. 2 (1999) 27 頁。

¹³前掲 8。特に竹内証の実験ノート参照。

4 臨界量に対する竹内証の表の再現

竹内の実験ノートの中には、1943年のはじめに求められた臨界量の表がある¹⁴。この表の理解の仕方については、深井論文で詳しく分析されている¹⁵。ここでは深井論文の case B をより自然な解釈として採用することにする。これによってウラン、水素、酸素の核のそれぞれの単位体積当たりの密度 n_U, n_H, n_O およびウラン 238 の吸収を免れる確率 p が決定される。臨界半径を決定する式は、(3) 式から、次のようになる。

$$R_c = \frac{\pi}{a_c},$$

$$a_c^2 = \frac{3}{\lambda} \left[(\nu - 1)n_U \sigma_{U1}^f - n_U \sigma_{U1}^a - n_O \sigma_{O1}^a \right. \\ \left. + n_H \sigma_{H1}^a \left(\frac{\nu p n_U \sigma_{U2}^f}{n_U (\sigma_{U2}^f + \sigma_{U2}^a) + n_O \sigma_{O2}^a + n_H \sigma_{H2}^a} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

ただし、

$$\lambda = \frac{1}{n_U \sigma_U^s + n_O \sigma_O^s + n_H \sigma_H^s} \quad (11)$$

ここで、 $\sigma_U^s, \sigma_O^s, \sigma_H^s$ は、それぞれ速い中性子に対するウラン、酸素、水素の散乱断面積である。また、竹内のノートの記述にしたがって、

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu (= 3) \quad (12)$$

と仮定した。

(10) 式には、決定すべき 11 の独立な断面積が存在する。これらを竹内の表にある臨界半径の値を再現するように決める必要がある。この課題は一見ほとんど不可能のように思われるが、当時、日本で知られていた外国の実験データを取り込むことによって、問題を軽減できる。ここで採用する実験データは荒勝文策が彼のメモの中で採用したものである¹⁶。3枚の便箋に書かれた荒勝のメモには、「July, 1945 荒勝先生ノメモ」という書き込みが1枚目の上部欄外にある。「荒勝先生」という表現が示すように、この書き込みは荒勝自身が書いたものでない。筆跡も違っている。さらに前号の深井論文で詳しく分析されているように、このメモでは、京都帝国大学で行われたウランによる比較的大きな中性子吸収の効果が考慮されていない¹⁷。これらのことは、荒勝のメモが京都大学での実験の前に書かれた可能性を示唆する。1944年10月4日に大阪水交会で行われた海軍と京都帝大のグループとの研究会では、Perrinの第一の論文が検討されたことが分かっているので、おそらくその後ほどなく、荒勝が研究グループの責任者として、Perrinの第二論文をもとに研究の方向を示す意味で作成したものであろう¹⁸。荒勝のメモが京都の研究の比較的初期に書かれたとすれば、それ以前に研究を始めていた理化学研究所のグループも、荒勝とほぼ同じデータを使用していたと仮定することが、許されるだろう。あるいは、理化学研究所のグループが使用したデータを、ほぼそのまま荒勝が使用したというべきかもしれない。

荒勝のメモで使用されたデータは、次のようなものである。比較のために、括弧内に戦後すぐのデータを示した¹⁹。

¹⁴ 同上。

¹⁵ 前出 3。

¹⁶ 前出 12。

¹⁷ 前出 13 の深井論文。

¹⁸ この会議の様子は、名古屋大学の坂田記念史料室に保管されている坂田昌一のメモ「ウランウム問題」(史料番号 44 01 WP 01) に書き残されている。

¹⁹ William E. Stephens, ed., *Nuclear Fission and Atomic Energy*, The Science Press (1948).

$$\begin{aligned}
\sigma_{U1}^f &= 0.1 & (0.5) \\
\sigma_{O1}^a &= 0.01 \\
\sigma_{H1}^a &= 1 & (1.7) \\
\sigma_{U2}^f &= 2 & (3) \\
\sigma_{U2}^a &= 1.3 & (3) \\
\sigma_{O2}^a &= 0.1 & (0.0016) \\
\sigma_U^s &= 6 & (6) \\
\sigma_O^s &= 0.6 \\
\sigma_H^s &= 2 & (\text{単位はバーン。以下同じ})
\end{aligned} \tag{13}$$

(10) 式には、 $\sigma_{U1}^a, \sigma_{H2}^a$ に関するデータも必要であるが、残念ながら荒勝のメモには、それらは与えられていない。そこでこれらの値をパラメータとして、竹内の表にある臨界半径が再現できるように、それぞれの値を適当に求めることにする。なお、 σ_U^f, σ_U^a については、分裂と吸収がそれぞれウラン 235 とウラン 238 によると見なして、

$$\sigma_U^f(\varepsilon) = \sigma_U^f \frac{\varepsilon}{0.007}, \quad \sigma_U^a(\varepsilon) = \sigma_U^a \frac{(1-\varepsilon)}{0.993} \tag{14}$$

とおいた。ここで、 ε はウラン 235 の濃縮度である²⁰。(14) 式のような取り方をすると、ウラン 235 の濃縮度が 100% の場合は σ_U^a は 0 となるので、未知数は σ_{H2}^a だけになる。したがって、 σ_{H2}^a は、濃縮度 100% の場合の臨界半径から一義的に決定できる。また、もう一つの未知数 σ_{U1}^a は、濃縮度がもっとも小さい 2% の値を再現するように決定すればよい。次の表は、このように求めた計算結果と竹内の表の値を示したものである。

U235 の濃縮度 (%)	100	50	30	20	10	5	3	2
臨界半径 (cm)								
竹内の値	15.5	16.6	16.9	17.2	20.7	22.8	27.6	35.3
再現値	15.9	16.9	17.2	17.2	19.9	21.9	26.1	35.5

再現に使用された断面積の大きさは、次の通りである。

$$\begin{aligned}
\sigma_{U1}^a &= 1.4 \quad (0) \\
\sigma_{H2}^a &= 0.1 \quad (0.3)
\end{aligned} \tag{15}$$

以上の計算結果は予備的なものであるが、再現の状態は満足すべき水準に達している。

5 「完全燃焼」仮説の検証

仁科の報告では「爆弾」には、10% 濃縮 10kg の臨界量に対して、その 2 倍のウランが使われることが想定されていた。球形をした 2 倍の装荷量の場合は、体系の半径は臨界半径の $3\sqrt{2} = 1.26$ 倍となる。このような臨界を超えた体系でも、反応の進行によって体系のウラン 235 の量が減少し、ある段階で臨界条件が失われる。反応が進んで行くと、ウラン 235 の減少によって相当する臨界半径は大きくなり、そして、それがちょうど元の体系の半径に一致したところで、臨界条件が破れ反応

²⁰断面積をこのようにおいたのは、荒勝の上記のメモ (12) にある「 U^{235} ノミガ fission フ起シ、 U^{238} ノミガ共鳴吸収ヲ ナスト考ヘ」という記述に従ったものであるが、 $\sigma_U^a(\varepsilon)$ の方は、メモにある表現がそのままでは理解不能であるため、意味を取って筆者が表示したものになっている。

が停止する。いま、 $\eta \times 100\%$ のウラン 235 が核分裂したとすると、簡単な計算から分かるように、その時の臨界半径は (10) 式で形式的にウランの分裂断面積を $(1-\eta)$ 倍することで計算できる。このような計算から、2 倍の臨界量から出発した場合、 η が 0.35 のところで反応が停止することが分かる。これは装填されたウランの中のウラン 235 の半分の量 1kg が 70% 反応したことに対応する。この計算では爆弾の威力は、TNT で 14 キロトンとなる。これは広島原爆の威力とほとんど同じである。

連鎖反応の時間的な進行の様子は、臨界を超える状態が形成される過程に依存するが、かれらがどのように臨界を超える状態を作ろうとしていたかについては、確かな裏付けがない。そこで、簡単のために、時間 $t=0$ で、体系が 2 倍の臨界量にあったとして、その後の時間変化を追うことにする。初期条件を

$$f_1 \approx 1 \quad (16)$$

とし、また、中性子数の成長とウラン 235 の消費が比例すると仮定する。この場合、時間 t に「完全燃焼」が終了し、反応したウラン 235 の原子核の総数の質量が 1kg となったとすると、

$$e^{\frac{t}{\tau}} = \frac{1000}{235} \times 6 \times 10^{23} \quad (17)$$

となる。これを解いて、

$$t = 56.2\tau (55.8\tau) = \frac{1}{26.1} \left(\frac{1}{26.3} \right) \text{秒} \quad (18)$$

が得られる (括弧内は 70% 燃焼の場合)。

以上の計算には、ウラン 235 が核反応の結果、減少していく効果が含まれていない。しかし、この効果を考慮した場合でも、反応の時間発展は初期の体系の条件でほとんど決まるので、反応時間に大きな変化はない。

以上の分析から、仁科たちが「完全燃焼」型の反応を予想していたことがほぼ裏付けられた。

6 おわりに—幻想としての理研「原子爆弾」—

この小論で示した内容は、仁科が戦後すぐに書いた文章の表現と一致している。1946 年はじめに雑誌『世界』に書いた記事の中で、広島に原爆が投下された直後、仁科は同盟通信の記者からトルーマン声明の内容を知らされ、「これはほんとうに原子爆弾かもしれない」と直感したと書いている。この判断は、この直前に陸軍から依頼されていた広島での放射線調査をする前の話である。トルーマン声明の中には「広島に使用した原子爆弾は T・N・T の火薬 2 万トンの威力に相当する」という表現があり、これを聞いた仁科は、この「数字は二、三年前我々の研究室の一人が計算して出した数字とピッタリ一致する」と考え、それが原爆であると即断したというのである²¹。じじつ仁科は、広島へ発つ直前に玉木英彦宛てに置き手紙を残し、トルーマン声明の数字は、「君 (玉木) の報告の数字とよく合致する」と書いている²²。これらの事実は、本小論の結論を裏書きしている。

しかし、仁科たちの考え方には、現在から考えると重大な問題がある。それは、たとえ遅い中性子反応であっても、核爆発によるエネルギーと圧力を、鋼鉄の覆いのようなもので押さえ込んでおくことは、不可能に近いということである。普通に想定される「覆い」は、通常爆弾で破壊できるだろう。容器としての覆いが破壊されれば、核物質の外界への拡散によって体系の密度は低下するので、

²¹ 仁科芳雄『世界』昭和 21 年 3 月号。

²² 玉木英彦、岩城正夫『仁科芳雄』国土社 1976 年、200-202 頁。

臨界条件が破れて反応は停止する。2 倍の臨界量から出発しても、半径がわずか 10% 膨張しただけで、反応は停止するから、結局、爆発の規模は、覆い破壊する程度、すなわち通常爆薬の程度にしかない。この点については、英米では早くから理解され、その克服のために高純度ウラン中での速い中性子反応へ爆弾開発の方向が転換していった。これとは対照的に理研の物理学者たちが体系の膨張による爆発規模の限界を真剣に検討しなかったのは、大きな謎と言わなければならない。

この小論のアイデアは、第二次世界大戦期の日本の核開発に関する科学史の研究会から生まれた。会のメンバー、特に原子炉の原理や歴史などに関してさまざまご教示をいただいた深井佑造氏には、一方ならずお世話になった。また、深井氏とは、この小論のアイデアをともに発展させることができた。里見志朗氏には、この小論のきっかけとなった安田武雄の記事の存在を教えていただいた。日野川静枝氏には、励ましと有益なコメントをいただいた。記して感謝の意を表したい。

Max Planck の熱輻射研究の方法的意味

小長谷 大介

1 はじめに

今から 100 年前の 1900 年に、Max Planck(1858-1947) によって量子概念が導入された。それは、相対性理論とともに現代物理学の新たな始まりを告げるものであった。Planck に関する科学史の先行研究は膨大に存在する。それらの多くは、量子概念の誕生の舞台となった、彼の熱輻射の研究に着目したものである。

Planck が熱輻射の研究に取り組んだのは、1890 年代半ばからである。彼は Hertz の電氣的線形振動子から着想を得て、輻射の電磁的メカニズムを考えた。それは、周囲を鏡壁で囲まれた空洞内に輻射があると仮定し、輻射に介在する共鳴子がエネルギーを放出・吸収することで、輻射の平衡状態が不可逆的に達成されるというものだった。このような考察に沿って Planck は、輻射場および共鳴子それぞれのエントロピーを想定した。1899 年 5 月の論文「不可逆的な輻射現象について」¹で彼は、一個の共鳴子のエントロピー S に表現を与えた。この S の式は、彼が当時実験結果に最も合うとみられた Wien の輻射式を導く上で重要な役割を果たした。1900 年になると、 S の式は、その形を多少変えるが、Planck が彼の輻射式を得る上で相変わらず重要なものであった。また、エネルギー量子は、 S に含まれる定数を特定化する過程で生まれたのである。Planck の熱輻射理論や量子概念の誕生にとって、 S の式は鍵となるものだった。したがって、Planck の研究方法を論じるには、彼のエントロピーの定式化に注目することが重要である。

Planck が、エントロピー S の式、中でも 1899 年 5 月の形の S の定式をどのように創出したのかという問題は、これまで科学史の先行研究の中で多く論じられてきた。その理由の一つは、彼が S の式を導入する際に何も説明を与えなかったからである。

本論は、それらの先行研究に批判的な考察を加えることから出発し、そこから 1899 年 5 月の論文の S の式の起原を再考するとともに、Planck の研究方法について考えていく。さらに、そこから Planck の熱輻射研究の方法の科学史的意味に立ち入ってみたい。

2 章では、彼の 1899 年 5 月の論文を概説し、 S の式の扱われ方を見る。続いて 3 章では、1899 年 5 月論文の S の式の起原に関する先行研究の諸見解とその問題点に触れる。4 章では、 S の式の起原の再考を行い、そこから見出される 1899 年 5 月論文の Planck の方法に対する一つの視点を示す。5 章では、4 章で提出される視点から、Planck の 1901 年までの諸論文を捉え、それらの論文での彼の研究方法を示す。6 章では、熱輻射研究での Planck の方法を考え、その科学史的意味を考察する。

¹M. Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge. 5. Mitteilung, S-B. Preu. Akad. Wiss., SS.440-480, 1899. (1899 年 5 月 18 日にプロイセンの科学アカデミーにおいて報告)

2 Planck の 1899 年 5 月論文における電磁的エントロピーの導入

2.1 共鳴子による熱輻射理論

Planck は、「不可逆的な輻射現象について」と題する 4 つの論文²を、1897 年から 1898 年にかけて発表した。彼は、4 論文をまとめ上げ、1899 年 5 月にプロイセンの科学アカデミーで同題の 5 つ目の論文³を報告した。これらの論文の熱輻射理論は、基本的には、共鳴子と輻射場から成る熱輻射に電磁気学的考察を加えるものだった。

1898 年の 4 つ目の論文以降、Planck は“自然輻射”⁴という仮定を取り入れた。振動数 ν の共鳴子が関与する輻射の振動数は ν の前後に幅を持っている。“自然輻射”の仮定は、この幅を事実上なくし、 ν の値で置き換えるという操作に対応する。この“自然輻射”の導入によって、輻射過程の不可逆性を妨げる要素が取り除かれた。Planck は、1899 年 5 月の論文でこの仮定を使い、振動数 ν の輻射が定常状態である場合の、輻射場のエネルギー密度 u_ν と共鳴子のエネルギー U_ν の関係を次のように導いた⁵。

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu d\nu. \quad (2.1)$$

ここで c は光速を表す。

2.2 エネルギー等分配法則の使用による展開

もし当時知られていたエネルギー等分配法則⁶を用いて考えると、(2.1) 式の導出後の展開は次のようになる。一つの共鳴子に割り当てられるエネルギー U_ν は、等分配則によって、絶対温度 T に Boltzmann 定数 k を掛けたものになる。

$$U_\nu = kT. \quad (2.2)$$

これを (2.1) 式に導入すれば、輻射場のエネルギー密度 u_ν は次の式になる。

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} d\nu. \quad (2.3)$$

これは後に Rayleigh-Jeans 式と呼ばれる、輻射のエネルギー分布式に他ならない。

エネルギー等分配則を使うと、(2.3) の輻射式が簡単に求められるのである。しかし、Planck はそうすることはなかった。彼は、(2.1) 式を導いた後、エネルギー等分配則を用いることなく理論を進めた。

²第 1 論文：M. Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge. 1. Mitteilung, S-B. Preu. Akad. Wiss., SS.57-68, 1897.

第 2 論文：M. Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge. 2. Mitteilung, S-B. Preu. Akad. Wiss., SS.715-717, 1897.

第 3 論文：M. Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge. 3. Mitteilung, S-B. Preu. Akad. Wiss., SS.1122-1145, 1897.

第 4 論文：M. Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge. 4. Mitteilung, S-B. Preu. Akad. Wiss., SS.449-476, 1898.

³cf. 脚注 1

⁴M. Planck, 第 4 論文, S.450.

⁵1899 年 5 月論文で Planck は、実際には、輻射場のエネルギー密度 u_ν と共鳴子のエネルギー U_ν の関係式 (2.1) ではなく、共鳴子に当たる、振動数 ν の直線偏光した一つの単色の輻射線の強さ R_ν と共鳴子のエネルギー U_ν の関係式を求めている。しかしここでは、後述の議論のために、(2.1) 式と同義な、 u_ν と U_ν の関係式を用いた。

⁶エネルギー等分配法則は、当時“Boltzmann-Maxwell 学説”と呼ばれよく知られていた。例えば、Kelvin 卿は 1900 年 4 月 27 日の Royal Institution での講演で“エネルギーの分配に関する Maxwell-Boltzmann の説”と述べた。エネルギー等分配則の歴史については、Max Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics, McGraw-Hill Book Company, 1966, pp.12-14. が詳しい。邦訳書 小出昭一郎訳『量子力学史 (I)・(II)』(東京書店, 1974), pp.15-17.

2.3 電磁的エントロピーの導入

(2.1) 式を求めた後、Planck は輻射線と共鳴子の間に起こるエネルギーの授受を考察することで、系全体のエネルギーの時間的変化式を求めた。次に彼は、系のエントロピー変化を導くために、以下のような共鳴子エントロピー S の式を、説明を与えずに導入した。

$$S = -\frac{U}{av} \log \frac{U}{ebv}. \quad (2.4)$$

ここで、 U は共鳴子のエネルギー、 ν は振動数、 e は自然対数の底、 a, b は定数である。この時点で彼は Planck は、通常の熱的現象と、電磁的現象が関与する熱的現象を分けて考えており、後者に対応するエントロピーを電磁的エントロピーと呼んだ。(2.4) 式は共鳴子の電磁的エントロピーである。

彼は、輻射場の電磁的エントロピーに対しても、(2.4) 式と同様な関係を導いた。それによって、系全体のエントロピーは、輻射場のエネルギー密度 u と共鳴子のエネルギー U による関数で表示される。彼は、この関数の時間的変化がつねに正になることを示し、輻射現象におけるエントロピーが増大することを証明したのである。

2.4 Wien の輻射式の導出

Planck は、熱力学的なエントロピーと電磁的な輻射エントロピーとを同等に扱えるものと見なし、エントロピー S と絶対温度 T の次の熱力学的関係式を輻射現象に適用した。

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}. \quad (2.5)$$

彼は、共鳴子の電磁的エントロピー S の (2.4) 式を U について微分し、これと (2.5) 式を使い、次の U と T の関係式を導いた。

$$\frac{1}{T} = -\frac{1}{av} \log \frac{U}{bv}. \quad (2.6)$$

この式に上述の (2.1) 式を代入して、彼は次のエネルギー輻射式を導いた⁷。

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} b \cdot \exp\left(-\frac{av}{T}\right) \quad (2.7)$$

これは、当時、実験的に信頼できると考えられた Wien 輻射式であった⁸。

⁷ここで Wien 輻射式は、今後の議論のために、振動数 ν の関数であるが、Planck の論文では、次のような波長 λ の関数になっている (cf. M. Planck, 1899 年 5 月論文, S.475)。

$$E_\lambda = \frac{2c^2b}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{ac}{\lambda\theta}\right).$$

⁸Wien の輻射式は、“やや疑義のある議論を基礎にしているにもかかわらず、当時得られていた実験データをうまく説明しようように思われた。一連の骨の折れる測定を行った Paschen と、この目的のために光度測定法を用いた Wanner は、少なくとも可視光の領域で、温度 4000 °C までの範囲で、Wien の法則が正しいと確かめた” (M. Jammer, 1966, p.10). cf. F. Paschen, Über die Verteilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers bei niederen Temperaturen. *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. zu Berlin*, SS.405-420, 1899. ; Lummer & Pringsheim, Die Verteilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers, *Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges. I*, SS.23-41, 1899. ; F. Paschen und H. Wanner, Eine photometrische Methode zur Bestimmung der Exponentialconstanten der Emissionsfunction, *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. zu Berlin I*, SS.5-11, 1899. ; cf. Hans Kangro, *Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes*, Franz Steiner Verlag, 1970, SS149-179.

2.5 1899年5月論文の特徴

1899年5月論文の特徴は、電磁的エントロピー S の方法をとったことである。当時一般的に知られていたエネルギー等分配則によって共鳴子のエネルギー U を考えるならば、 U は温度 T によって kT と表される。この関係式を用いれば、エネルギー輻射式は Rayleigh-Jeans の式 (2.3) として簡単に求められる。しかし、Planck は等分配則を使わずに、 S の (2.4) 式を導入し、(2.6) 式のような U と T の関係を導いた。彼がこの方法から得たエネルギー輻射式は、Wien の式 (2.7) であった。エントロピー S の式に注目する方法は、彼自身が回想録で述べたように⁹、当時の熱輻射の研究の中でユニークなものであった。

Planck がとった方法の中で最も重要な鍵は、 S の (2.4) 式の導入である。しかし、彼はそれに対して何ら説明を与えなかった。そのために、彼がどのように S の式を求め導いたのかは明らかではなかった。

3 エントロピー式の起原に関する先行研究の概観

3.1 L.Rosenfeld らの見解

1899年5月論文のエントロピー S の式の起原に関して、科学史家の見解は、主に二つに分かれている。第一の見解は、L.Rosenfeld が 1936 年に指摘し、M.J.Klein が 1962 年に明確に展開したもので、Wien 輻射式 (2.7) からの逆算によって求められたという見解である。これは、これまで多くの科学史家によって支持されてきた¹⁰。それに対して、第二の見解は、T.Kuhn が 1978 年に示唆し¹¹、O.Darrigol が 1992 年に展開したもので、Boltzmann の H 関数に基づいて求められたという見解である。

Rosenfeld は 1936 年の論文で、“明らかに Planck は、輻射エントロピー s と共鳴子エントロピー S の関数を選ぶにあたり、Wien 法則 (Wien 輻射式) によって導かれたにちがいない”¹² と述べた。 s は輻射場のエントロピーを指す。Rosenfeld は、Planck が Wien 輻射式という彼の論文の結論が出てくるように S を選定したというのである。すなわち、結果に合わせて S に対する仮定をおいたということである。Klein は 1962 年の論文で、Rosenfeld の見解を受け継ぎながら、“Planck は、(S の式の導出にあたり) Wien 分布法則の式によって道案内されたようである”¹³ と記した。Klein は、その論文の脚注で、共鳴子エントロピー S の (2.4) 式がどのようにして Wien 輻射式から逆算して求められるのかを、以下のように示した。

まず、Wien 輻射式 (2.7) と輻射のエネルギー密度と共鳴子のエネルギーの関係式 (2.1) から、次式

⁹Planck は、1943 年の回想録「物理的作用量子の発見の歴史について」の中で次のように述べた。“…実験の面からも理論の面からも、正常スペクトルのエネルギー分布の問題には多くの優れた物理学者が取り組んでいたが、彼らはすべて輻射強度を温度 T の関数として表現しようという方向でのみ研究していたのに対して、私はエントロピー S がエネルギー U に依存している点に、より深い関連を推定していた。エントロピー概念の意義がまだ正当な評価を受けておらず、私の方法には誰も注意を払わなかったため、私は十分な時間をかけて徹底的に計算をやってみることができ、どこからか邪魔されはしないか、追いつかれはしないかと心配する必要はなかったのである。” M.Planck, *Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums, Vorträge und Erinnerungen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1973, S.21. [邦訳書 田中加夫ら訳「現代物理学の思想 (上)」(法律文化社, 1971)p.26]

¹⁰西尾成子訳『熱輻射論講義』(東海大学出版, 1975)解説, p.213. [原典 M.Planck, *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, J.A.Barth, 1906.], Hans Kangro, 1970, S.142. Max Jammer, 1966, p.15.

¹¹cf. T.Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Oxford University Press, 1978, p.90. Kuhn は Darrigol の見解を示唆したが、示唆だけにとどめ Rosenfeld らの見解を支持した。

¹²L.Rosenfeld, *La première phase de l'évolution de la Théorie des Quanta, Osiris* 2, 1936, pp.149-196. [The First Phase in the Evolution of the Quantum Theory, *Selected Papers of Léon Rosenfeld*, Boston Studies in the Philosophy of Science Vol.XXI, edited by Robert S.Cohen and John J.Stachel. 1979, pp.193-234.] p.200.

¹³M.J.Klein, *Max Planck and the Beginning of the Quantum theory, Arch. Hist. Exact. Sci.*, vol.1, 1962, p.463.

が求められる。

$$U_\nu = b\nu \exp\left(-\frac{a\nu}{T}\right). \quad (3.1)$$

この式を T について解き、 S と T の熱力学的関係式 (2.5) を使うと、次のような関係式が得られる。

$$\frac{dS}{dU} = -\frac{1}{a\nu} \log \frac{U}{b\nu}. \quad (3.2)$$

これを U について積分すると、電磁的エントロピー S の (2.4) 式が導かれる。加えて Klein は、Wien 輻射式とは異なる形のエネルギー輻射式から “逆に (rckwrts) エントロピーの表式を算出すれば、...”¹⁴ という 1899 年 5 月論文の終わりの Planck の言葉から、輻射式から S の表式へという Planck の思考ルートを連想できるとした。

Rosenfeld, Klein の主張が正しければ、Planck が何の説明も与えずに導入した S の表式は、Wien の式からの逆算で求められたことになる。Planck はその事実を明示せずに 1899 年 5 月論文を書いたということである。Wien の輻射式は、1899 年当時、最も実験結果と一致するものとして知られていた。そして、Planck は 1879 年から 1890 年代初めまで取り組んできた熱力学の研究で、 S と T の関係式 (2.5) に慣れ親しんでいた¹⁵。さらに 2.1 節で見たように、彼は S の (2.4) 式を導入する前段階で、輻射のエネルギー密度 u と共鳴子のエネルギー U の関係式 (2.1) を導いていた。これらの式を使って、Planck が、Wien 輻射式に対応するように S の表式を (2.4) の形に決めたという見方は考えられないことではない。したがって、M.J.Klein が示した、Wien 輻射式 (2.7) から S の (2.4) 式に至る計算は、実際に Planck が辿った思考ルートに合致するのかもしれない。

Klein のような解釈も不可能ではないし、一定の説得力を持っている。そのため、多くの科学史家によって支持された。しかし、だからと言って、Rosenfeld らの見解が実証されたというわけではない。Klein が証拠とした Planck の言葉の意味は Klein の推測である。そう考えると、Rosenfeld らの見解は、必ずしも十分な証拠をもっているとは言えない。

3.2 O.Darrigol の見解

Rosenfeld らの見解に対して、Darrigol の見解は、 S の (2.4) 式が Boltzmann の H 関数に基づいて求められたというものである。Kuhn は 1978 年の著作のなかで次のように述べた。“Planck の式 (S の (2.4) 式) と Boltzmann の式 (以下に示す H 関数の式) との明らかな類似性” は、エントロピー S による方法をとった Planck に “勇気づけを与えたのではないだろうか”¹⁶ と。Darrigol はこの示唆を明確に展開した。彼は 1992 年の著作¹⁷で、Boltzmann の気体論と Planck の熱輻射論における方法の “微妙で複雑な”¹⁸ 関係を明らかにし¹⁹、 S の (2.4) 式の起原についても、次のような新しい

¹⁴M. Planck, 1899 年 5 月論文, S.476. また、この言葉は、T. Kuhn(1978, p.89) も引用している。

¹⁵cf. M.Planck, Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, Inauguraldissertation, München, Th.Ackermann, 1879. ; M.Planck, Über das thermodynamische Gleichgewicht von Gasgemengen, it Wiedemann Annalen 19, SS.358-378, 1883. ; M.Planck, Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 1.Abhandlung, it Wied. Ann. 30, SS.562- 582, 1887. ; M.Planck, Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 2.Abhandlung, it Wied. Ann. 31, SS.189-203, 1887. ; M.Planck, Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 3.Abhandlung, it Wied. Ann. 32, SS.462-503, 1887.

¹⁶T.Kuhn, 1978(脚注 11), p.90.

¹⁷Olivier Darrigol, From c-Numbers to q-Numbers -The Classical Analogy in the History of Quantum Theory-, University of California Press, 1992.

¹⁸Ibid., p.4.

¹⁹これまで、Planck と Boltzmann の方法の関係は、1900 年 12 月の論文や 1901 年の論文における確率論的方法をめぐって、主に論じられてきた (ex. Klein, 1962, pp.472-476). 1899 年論文となると、自然輻射の仮定と Boltzmann の方法との関係 (ex. Kuhn, 1978, p.77) や、 S の (2.4) 式と H 関数との関係が示唆されるにとどまっていた。それに対して、Darrigol は、1899 年 5 月論文における、Planck と Boltzmann の方法そのものの対応関係を明示した。

見解を提示した。

まず Darrigol は、 S の (2.4) 式が以下の Boltzmann の H 関数によく似ていることに注目した。

$$H = \int f \log f d^3v. \quad (3.3)$$

ここで $f(v)$ は、気体分子の速度 v の Maxwell 速度分布関数で、 $f(v)d^3v$ は速度空間 d^3v 中の分子の数を表す。H 関数は、Boltzmann が示したように、平衡状態に近づくに従って小さくなる関数で、エントロピーの符号を反対にしたものに対応する。Darrigol によれば、Planck は、(3.3) 式のアナロジーから S に関する次式を得た。

$$S = -\frac{U}{f(v)} \log \frac{U}{g(v)}. \quad (3.4)$$

他方、輻射のエネルギー密度 u に対する Wien 変位則

$$u_\nu = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (3.5)$$

と共に鳴子エネルギー U の関係式 (2.1) から、次式が求められる。

$$\frac{U}{\nu} = A \cdot F\left(\frac{\nu}{T}\right). \quad (3.6)$$

ここで $A [= \frac{c^3}{8\pi}]$ は定数である。Wien 変位則は、当初 1893 年の Wien の論文²⁰では、輻射が平衡な場合に温度 T と波長 λ の積が一定になることを表したが、1896 年の論文²¹で (3.5) に準ずる式となった。

次に、(3.6) 式を $\frac{\nu}{T}$ について微分したものと、エントロピー S と温度 T の熱力学的関係式 (2.5) を用いて、

$$dS = A \frac{\nu}{T} F'\left(\frac{\nu}{T}\right) d\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (3.7)$$

が得られる。(3.6) 式によれば、 $\frac{\nu}{T}$ は $\frac{U}{\nu}$ だけの関数になるので、(3.7) 式は $\frac{\nu}{T}$ の代わりに $\frac{U}{\nu}$ だけの関数になる。したがって、 S は次式のような $\frac{U}{\nu}$ にだけの関数になる。

$$S = B \cdot G\left(\frac{U}{\nu}\right). \quad (3.8)$$

ここで B は定数、 G は関数を示す。(3.8) 式は、Planck が 1901 年の論文「正常スペクトルにおけるエネルギー分布の法則について」²²で“私の知っている最も簡単な Wien の変位則の表し方”²³と呼んだものである。 S が (3.8) 式のように表されるならば、(3.4) 式中の $f(v)$ と $g(v)$ は、定数 a, b を使い、 av と bv となり、次式が得られる。

$$S = -\frac{U}{av} \log \frac{U}{bv}. \quad (3.9)$$

²⁰W. Wien, Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie, *S-B. Preu. Akad. Wiss.*, SS.55-62, 1893.

²¹W. Wien, Über die Energieverteilung im Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers, *Ann.d.phys* 58, SS.662-669, 1896.

²²Max Planck, Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, *Annalen der Physik* (4) 4, SS.553-563, 1901.

²³Planck, 1901 年論文, S.561.

Darrigol は、最終的に b を b' に自然対数 e を掛けたものによって置き換え、(3.9) 式を Planck の S の (2.4) 式と同一なものにした。このようにして、彼は H 関数のアナロジーから S の (2.4) 式が求められることを具体的に示したのである。

3.3 Darrigol の見解の問題点

Darrigol によれば、Planck は 1899 年 5 月の論文で H 関数からのアナロジーによって S の式を演繹的に求めたことになる。 H 関数は、1872 年の論文²⁴で Boltzmann が気体分子運動論を基盤にして生み出し、1896 年の『気体論講義 I』²⁵でまとめられた。Planck は、1894 年の論文²⁶で、気体分子運動論の不可逆性問題に関する Boltzmann の見解に反論²⁷し、また、1899 年 11 月に *it Annalen der Physik* に受理された論文²⁸では、Boltzmann の『気体論講義 I』を引用した。Planck が 1899 年 5 月の時点で H 関数を熟知していたことは十分考えられる。

しかし、 S の (2.4) 式を導くうえで、Planck が (3.5) 式ないし (3.8) 式の形の Wien の変位則を使用したという Darrigol の主張には問題がある。Planck が明確に Wien 変位則に言及するのは、1900 年 10 月の論文「Wien のスペクトル式の一つの改良について」²⁹以降である。Planck は 1901 年の論文で、(3.5) の形の Wien 変位則を“M.Thiesen によって与えられた”³⁰式から導いて、(3.5) 式から (3.8) の形の Wien 変位則を求めた。Planck が引用した Thiesen の論文は、1900 年 2 月 2 日にドイツ物理学会の例会で報告されたものである³¹。1899 年の時点では、Planck は Wien 変位則に触れることさえしていなかった。Darrigol は 1899 年 5 月論文に Planck が Wien 変位則を用いたことを前提としている。彼は、Planck が Wien 変位則を使い始めた時期や Planck の引用に十分な注意を払っていない。彼の主張には、Wien 変位則の使用に関する、歴史的な順序という点で問題がある。

Darrigol の主張が正しいとすれば、Planck は S の (2.4) 式を演繹的に導いたと解釈できる。一方、 S 式が Wien 輻射式の逆算から導かれたとする、Rosenfeld, Klein の主張をとるならば、Planck の S 式の導き方は非演繹的なものだったという解釈になる。

²⁴ L. Boltzmann, Weitere Studien Über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen, *Si Wien* 63, SS.275-370, 1872.

²⁵ L. Boltzmann, Weitere Studien Über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen, *Si Wien* 63, SS.275-370, 1872.

²⁶ M. Planck, Über den Beweis des Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilungsgesetzes unter Gasmolekülen, *it Wied. Ann.* 55, SS.220-222, 1895.

²⁷ Planck は 1894 年時に、気体分子運動論による気体の均一系の解離平衡論に関して、Boltzmann らの成果が実験事実との良い一致を示していることから、それらを正しく評価している。つまり、Planck は気体分子運動論を盲目的に反論したわけではない。cf. 井上隆義「解離平衡論にみるプランクとボルツマンの理論と方法」(『物理学史—その課題と展望—』No.4, 1989, pp.1-18.)

²⁸ M. Planck, Über irreversible Strahlungsvorgänge, *Annalen der Physik* (4) 1, SS.69-122, 1900.

²⁹ Max Planck, Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung, *Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges.* I, SS.202-204, 1900. (1900 年 10 月 19 日のドイツ物理学会の例会において報告)

³⁰ Planck, 1901 年論文, S.559. M.Thiesen によって与えられた式は、振動数 ν ではなく波長 λ によって表された Wien 変位則である。

³¹ Max Thiesen, Über das Gesetz der schwarzen Strahlung, *it Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges.* II SS.65-70, 1900.

4 逆算からわかる 1899 年 5 月論文の方法

4.1 1900 年 3 月論文の S の導出の証明

Planck は 1900 年 3 月の論文「輻射熱のエントロピーと温度」³²で Wien 輻射式の理論的再確認³³を行い、それまで“途中の経過を詳しく触れなかった”³⁴と述べながら、 S の (2.4) 式の導出の説明を示した。もしそこで提示された説明が完全に演繹的なものであれば、(2.4) 式は Wien 輻射式からの逆算を考えなくても求められることになる。それによって、1899 年 5 月論文における (2.4) 式の導入も、Wien 輻射式からの逆算に因っていないと考えることもできる。

Planck は、まず振動数 ν の一つの共鳴子によって生じた系全体のエントロピーの変化 dS_t を導くことから始めた。定常状態にある場合、共鳴子のエネルギー U が ΔU だけずれた時の dS_t は、共鳴子のエントロピー S によって、

$$dS_t = dU \cdot \Delta U \cdot \frac{3}{5} \frac{d^2 S}{dU^2}, \quad (4.1)$$

となることが示された。この式は、系全体のエントロピー変化が S と U だけで表されることを示す。また、エントロピーが極大となるためには、正の関数 $f(U)$ によって、

$$\frac{3}{5} \frac{d^2 S}{dU^2} = -f(U), \quad (4.2)$$

となっていなければならないことが明らかにされた。

次に、Planck は、輻射場のなかに一個ではなく、任意の大きな数 n 個の共鳴子がある場合を仮定した。そこで彼は、 n 個の共鳴子についてのエネルギー U_n を一個の共鳴子の場合の U を n 倍したものに等しいとした。エントロピー S についても同様に考察することによって、(4.2) 式の $f(U)$ が、

$$f(nU) = \frac{1}{n} f(U), \quad (4.3)$$

となることを示した。ここから、 $f(U)$ が次のように求められる。

$$f(U) = \frac{\text{const}}{U}. \quad (4.4)$$

この式と (4.3) 式から、エントロピー S の二階微分は次式となる。

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U}. \quad (4.5)$$

ここで α は正の定数である。この式を二回積分すると、次式が得られる。

$$S = -\alpha U \cdot \log(\beta U). \quad (4.6)$$

ここで β は第二の正の定数である。その後、Planck は“W. Wien の熱力学的な考察”³⁵によって、 α と β を次のように決めた。

$$\frac{1}{\alpha} = a\nu, \quad \frac{1}{\beta} = e b \nu. \quad (4.7)$$

³²Max Planck, Entropie und Temperatur Strahlender Wrme, it Annalen der Physik, (4) 1, SS.719-737, 1900. (1900 年 3 月 22 日に it Annalen der Physik に受理された論文)

³³Lummer らの実験家たちは、1899 年 11 月 3 日の報告で、大きな波長領域では Wien 輻射式と測定結果が食い違うことを示した [Lummer & Pringsheim, 1. Die Verteilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers und des blanken Platins; 2. Temperaturbestimmung fester ghender Krper, Verhandlungen der Deutshen Phys. Ges. I, SS.215-235, 1899.]. それに応じて、Planck は Wien 輻射式の理論的再確認を行った。

³⁴M. Planck, 1900 年 3 月論文, S.720.

³⁵M. Planck, 1900 年 3 月論文, S.733.

これを(4.6)式に代入して、共鳴子のエントロピー S の(2.4)式が得られる。

4.2 S の導出の検証

Planck は、1900年3月論文で S の(2.4)式を導く際に、“W.Wien の熱力学的な考察”によって定数 α, β を決めている。“考察”の内容は、Planck の論文上では明確ではない。彼は、後に1906年の『熱輻射論講義』で、1900年3月論文と同様な(2.4)式の導き方を再び提示したが³⁶、“考察”に触れることはなかった。

T.Kuhn は、“考察”を Wien 変位則(3.5)とみなして³⁷、1900年3月論文の結論を“Wien 分布法則(輻射式)の最初の完全な証明”³⁸と述べた。武谷三男も同様の見解を示した³⁹。たしかに、“考察”を(3.5)の形の Wien 変位則とすれば、定数 α, β が(4.7)のように決定される。つまり、 S の(4.6)式の導出後、 S と T の関係式(2.5)、 u と U の関係式(2.1)式を使うことで、 α, β を含む u に関する式が求められる。そして、この式を Wien 変位則(3.5)と比較すれば、 α, β が決まり、 S の(2.4)式、さらに Wien 輻射式(2.7)が得られるのである。しかし、3.3.節で触れたように、Planck は1900年10月論文から(3.5)の形の Wien 変位則を使い始めている。Kuhn らの“考察”は、Planck の現実の歴史における Wien 変位則の使い方と食い違うのである。

また、Planck は1900年3月論文で“考察”を用いる直前に、次のような輻射線の強さ R に関する式を立てている⁴⁰。

$$R = \frac{\nu^2}{\beta e c^2} \exp\left(-\frac{1}{\alpha T}\right) \quad (4.8)$$

もし彼が Wien 変位則(3.5)を知っていたならば、(3.5)式のような、輻射のエネルギー密度 u に関する式を立てたであろう。

$$u_\nu = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (3.5)$$

それは、Wien 変位則(3.5)との比較で定数 α, β を得るためには、 u に関する式が必要になるからである。しかし、Planck は u ではなく R の式を立てた。これは、(3.5)の形の Wien 変位則を Planck が使用していなかったもう一つの証拠になる。

Kuhn らのように、1900年3月論文で Planck が Wien 変位則(3.5)を使ったとみなすと、 S の(2.4)式および Wien 輻射式(2.7)の導く、Planck の証明は尤もらしく見える。しかし、Planck の Wien 変位則の当時の使い方や引用の仕方に着目すると、彼が“W.Wien の熱力学的な考察”において、(3.5)の Wien 変位則を適用したとは考えられない。Kuhn らの見解は、Planck の引用などへの考慮を欠いており、1900年3月の時点の実際の文脈に沿ったものと言えない。したがって、1900年3月論文で Planck が S の(2.4)式と Wien 輻射式(2.7)を導く“完全な証明”を行ったと断定することは出来ない。

4.3 逆算の可能性から 1899年5月論文の方法への視点へ

Planck による Wien 変位則の取り扱いに着目するならば、結局、1900年3月論文の時点でも(2.4)式の導出は成功していない。そして、1899年5月論文で Planck が H 関数に基づいて(2.4)式を導い

³⁶ M. Planck, 1906(脚注10の著作), SS.217-220.

³⁷ Kuhn は、 S の二階微分式の(4.5)式、熱力学的関係式(2.5)、Wien の変位則(3.5)の三つが、“Wien 分布法則および共鳴子エントロピーの表式[(2.4)式を指す]をもたらした”(T.Kuhn, 1978(脚注11), p.96)と述べた。

³⁸ T.Kuhn, 1978(脚注11), p.92.

³⁹ 武谷三男『量子力学の形成と論理～(1)原子模型の形成～』(銀座出版社, 1948), pp.20-23.

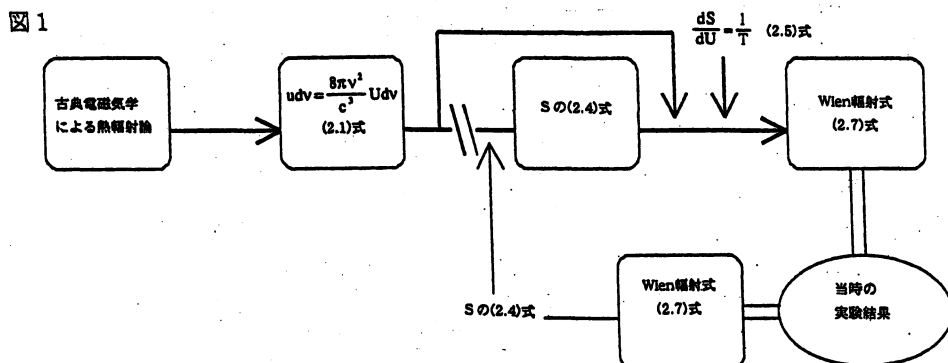
⁴⁰ cf. M.Planck, 1900年3月論文, S.733.

たという Darrigol の見解も成立しないのである。このように見ると、Planck は (2.4) 式を演繹的に求めることができたとは判断できない。

ここで、2.5 節で示した、すなわち、Planck による (2.4) 式の求め方についての問題に立ち返ろう。(2.4) 式が演繹的に求められたという見解が成立せず、まして、1900 年 3 月論文になっても Planck が (2.4) 式の導出の証明に成功していないとするならば、1899 年 5 月論文で彼は S の (2.4) 式を演繹的ではない方法で導出したと考えるしかないだろう。

演繹的でなかったとした場合、 S の (2.4) 式が Wien 輻射式 (2.7) の逆算から求められたとする Rosenfeld らの主張が挙げられる。彼らの問題点は、3.1 節で述べたように、十分な証拠を欠くことであった。しかし、その見解が当時の Planck の文脈に沿っていたことは確かである。熱力学の研究で S と T の関係式 (2.5) に馴染んでいた Planck は、Wien 輻射式から S の (2.4) 式を逆算しそうな条件を備えていた。むしろ、Planck が逆算したことに対する反証例を見出すことの方が困難である。(2.4) 式の演繹的な導出を指向する Darrigol の見解などが、Planck の Wien 変位則の使用に関する問題を抱え込んでいたことに比べると、逆算による Rosenfeld らの見解はより矛盾が少ない。すなわち、Planck は 1899 年 5 月論文で逆算という非演繹的な形で S の式を求めたと考える方が現実的なのである。

Rosenfeld らの見解が正しいとすれば、1899 年 5 月論文に関して二つのことが言える。一つは、 S の (2.4) 式が、1899 年 5 月論文の結論である Wien 輻射式 (2.7) から逆算して求められたので、1899 年 5 月論文で見られる理論展開と Planck の思考過程は逆方向になっていることである。二つ目は、古典電磁気学を前提にした Planck の熱輻射理論に、逆算して得た S の (2.4) 式を導入したことで、当初の彼の前提から (2.4) 式を求めることができず、導入前後で論文の流れに理論的断絶が起こっているということである。二つ目に関しては、当初の熱輻射論の前提から得られた、輻射のエネルギー密度 u と共鳴子のエネルギー U の関係式 (2.1) が、Wien 輻射式 (2.7) を導く際に必要になることを付け加えておかなければならない。これらのことを踏まえて、さらに、輻射式の導出に S と T の熱力学的関係式 (2.5) が利用されていることを考慮すれば、1899 年 5 月論文の Planck の方法を次のように図式化できる。



5 1900年10月以降の論文

5.1 1900年10月論文で Planck が行ったこと

非常に長い波長部分に対する輻射のエネルギー測定の結果と Wien 輻射式 (2.7) との決定的な不一致⁴¹を, Planck は 1900 年 10 月 7 日に Rubens と面会した際に知った⁴². Rubens の結果を受けた Planck は, 1900 年 10 月のドイツ物理学会の例会で新見解を発表した. そこで彼は, 1900 年 3 月論文で導いたエントロピー S のエネルギー U に関する二階微分式 (4.5) が “私が与えたほどの意義を一般的にはもっていないこともあり得る”⁴³と述べた. 彼は, Wien の輻射式から求められる S の式 (2.4) とは異なるが, それと同じように, 熱力学と電磁気学の理論のあらゆる要請を完全に満たす任意な S の表式を組み立てることを考えたのである.

報告の際に Planck は, 次のような, 共鳴子エントロピー S とエネルギー U の関係式を示した.⁴⁴

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U(\beta+U)}. \quad (5.1)$$

ここで α と β は前章とは異なる正の定数である. 彼は, S を U に関する二階微分式が, これまでの (4.4) 式ではなく, (5.1) 式の形になるとした. この式を提示した理由について, 彼は “単純性という点で Wien 輻射式によるもの [(4.4) 式] に最も近い”⁴⁵ことを挙げた.

(5.1) 式の導出後, Planck は, 輻射式を導くために, S の U に関する微分式と温度 T の熱力学的関係式 (2.5) と, S が $\frac{U}{T}$ だけの関数になるという (3.8) 式の Wien の変位則を使った. これは, 彼が (5.1) 式を二回積分したことを示している. 二回積分式は次のようになる.

$$S = \frac{\alpha}{\beta} \{ (U + \beta) \log(U + \beta) - U \log U \}. \quad (5.2)$$

彼は, このような S の式を使い, 次の新しい輻射式を得た⁴⁶.

$$u_\nu = C_1 \nu^3 \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2 \nu}{T}\right) - 1} \quad (5.3)$$

ここで C_1, C_2 は定数で, α と β で表すと, $\frac{8\pi^5 \beta}{15 C_1^4} \frac{\alpha}{\nu^3}$ となる. この式は, 今日 Planck 輻射式と呼ばれるものであり, Rubens の実験データとよく一致した⁴⁷. 1900 年 10 月論文で, Planck は (5.3) の輻射式が新しい実験結果を “満足に再現する”⁴⁸と述べた.

⁴¹長い波長部分における測定結果と Wien 輻射式との不一致は, 脚注 33 を含め, 1900 年の初めからすでに Lummer と Pringsheim によって主張されていた. O.Lummer & E.Pringsheim, Über die Strahlung des schwarzen Körpers für lange Wellen, *Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges. II*, 1900, S.171. では, 波長 12μ から 18μ の範囲における測定結果が Wien 式と一致しないことが記されている.

⁴²cf. Hans Kangro, 1970, S.206. ; G.Hettner, Dem Andenken an Heinrich Rubens, *Die Naturw.* 10, 1922, S.1037.

⁴³M.Planck, 1900 年 10 月論文, S.203.

⁴⁴1900 年 10 月論文の実際の (5.1) 式は, 負の符号を付けていない. しかし, 本来なら, 負の符号が必要ははずである.

⁴⁵M.Planck, 1900 年 10 月論文, S.203.

⁴⁶1900 年 10 月論文で Planck は, (6.2) 式を, 振動数 ν によるのではなく, 波長 λ によって次のように表している.

$$E_\lambda = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

ここで E_λ は波長 λ の場合の輻射のエネルギー密度である. しかし, これまでの議論に沿うように, ここでは振動数 ν による輻射式を使用した.

⁴⁷H.Rubens & F.Kurlbaum, Über die Emission langwelliger Wärmestrahlen durch den schwarzen Körper bei verschiedenen Temperaturen, *Sitzungsber. d.k.Akad. d. Wiss. zu Berlin* vom 25.Oct, SS.929-941, 1900. Planck 輻射式は, 1900 年末において, Rubens や Paschen の実験によって支持された一方で, Lummer と Pringsheim らは, Planck 式を重要視しなかった. cf. ; F.Paschen, *it Annalen der Physik* . 309, 1901, SS.277-98. ; Jahnke & Lummer & Pringsheim, *it Annalen der Physik* . 309, 1901, SS.225-30.

⁴⁸M.Planck, 1900 年 10 月論文, S.204.

5.2 1900年12月論文, 1901年論文の熱輻射理論

Planck は, 1900年10月論文の発表後, 新しい S の式 (5.2) がどのようにして求められるかという問題に取り組んだ。1900年12月の論文⁴⁹で, 彼は輻射式 (5.3) を Boltzmann の確率論的考察から導く方法を示唆した⁵⁰。このとき彼は, “エネルギー要素 ε ”⁵¹ が定数 h に振動数 ν を掛けたものになることに触れた。

1901年の論文になると, Planck はこの方法を明確に展開した。そこで彼は, 確率論的方法によって, P 個のエネルギー要素 ε を N 個の共鳴子に配分する仕方の数を考察し, 次の式を導いた。

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \log \left(1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \frac{U}{\varepsilon} \log \frac{U}{\varepsilon} \right\}. \quad (5.4)$$

ここで k は Boltzmann 定数である。この式は上の (5.2) 式に対応している。このようにして, 彼は S の式の導出を説明つけた。

それから, Wien 変位則 (3.8) 式を (5.4) 式に適用すると, 次式が得られる。

$$\varepsilon = h \cdot \nu. \quad (5.5)$$

ここで h は Planck 定数である。このようにしてエネルギー量子を表す (5.5) 式が導かれた。そして, (5.4) 式は次式になる。

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{h\nu} \right) \log \left(1 + \frac{U}{h\nu} \right) - \frac{U}{h\nu} \log \frac{U}{h\nu} \right\}. \quad (5.6)$$

これと, 輻射のエネルギー密度 u と共鳴子エネルギー U の関係式 (2.1), S と T の関係式 (2.5) から, (5.3) 式の二つの定数が特定化された新しい輻射式が得られる。

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}. \quad (5.7)$$

こうして Planck は, 量子概念を導入することによって, Planck 輻射式を導出するのに成功したのである。

5.3 1901年論文の方法の図式化

新しい実験結果に対応するために, Planck は 1900年10月論文で, 共鳴子エントロピー S のエネルギー U に関する二階微分式を新しい形 (5.1) を示した。そして, 微分式 (5.1) を二回積分し, それに S に関する Wien 変位則 (3.8) を適用して, さらに, S と T の熱力学的関係式 (2.5) を使い, 新しい輻射式 (5.3) が導かれた。1900年10月論文で彼は, S の U についての二階微分式が (5.1) の形になるならば, 新しい実験結果に一致する輻射式が導出されることを示したのである。

1900年10月論文のあと, Planck は, 新しい S の表式と輻射式を導く熱輻射理論をつくり上げることに取り組んだ。1900年12月論文では, 確率論的な方法によって, 新しい輻射式 (5.3) が求めら

⁴⁹Max Planck, Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, *Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges. II*, SS.237-245, 1900. (1900年12月14日のドイツ物理学会の例会における報告)

⁵⁰確率論的方法を使うことに関しては, Planck は 1900年10月論文の時点ですでに考えていたのかもしれない。1900年10月論文の204頁で, 彼は S の U の対数関数を, 括弧づけながら “確率論からもそう仮定することが示唆される” と述べている。

⁵¹Planck, 1900年12月論文, S.240. ここで Planck は自然定数 h が $6.55 \cdot 10^{-27}$ となることを記した。ちなみに, エネルギー要素 ε に近いものは, 1877年の Boltzmann の論文にすでに現れていた。L. Boltzmann, Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht, *Si Wien* 76 (II), SS.373-435, 1877. この論文で Boltzmann は, 各分子の取る運動エネルギーの最小単位を ε としたが, 最終的に極限で ε を 0 とした。

れるのではないかということが示唆されたに過ぎない。1901年論文になると、Planckは、確率論的な考察によって、実際に S の式を理論的に導いた。それから、 S の式にWien変位則(3.8)を適用し、 S を U について微分して、さらに S と T の熱力学的関係式(2.5)を使うことによって、Planck放射式(5.7)を導いた。1901年論文で彼は、確率論的な考察から S の式を導き、その S から放射式を求めるという理論的説明を明示したのである。1900年10月論文の結果は、1901年論文で理論的に補足されたように見える。

Planckが S の式を導くために行った確率論的考察は、 P 個のエネルギー要素 ε を取り扱うものである。この考察は、結果的に量子概念を取り入れている。一方、彼の熱放射理論の前提は古典電磁気学である。彼が1901年論文で導入した確率論的考察は、その前提から導かれるものではない。1901年論文で彼は、 S の式や放射式を確率論的考察によって演繹的に導くことを示したが、その考察、とくにエネルギー量子の仮定は、古典力学を基礎にする熱放射理論の前提から導かれるものではなかった。したがって、1901年論文でPlanckは、1900年10月論文で示したことを彼の熱放射理論の中に組み込むことに成功したわけではない。

1900年10月論文の主旨は、 S の U に関する二階微分式(5.1)を積分することによって、実験結果と一致する新しい放射式を示すことであった。それに対して、1901年論文では、 S の式を微分することによって、Planck放射式が導出されることが示された。また、エネルギー要素 ε による確率論的考察は、古典電磁気学を前提にしたPlanckの熱放射理論から導かれるものではなく、その理論との間に理論的連続性を欠くが、 S の表式を導出するためには必要なものであった。このように見ると、1901年論文の方法は、1900年10月論文で示された、実験結果と S の式との関係を前提にして、 S を確率論的考察から理論的に導き、 S から新しい放射式を求めるというものである。

これらを考慮すれば、1901年論文の流れは次のように図式化できる。

図2

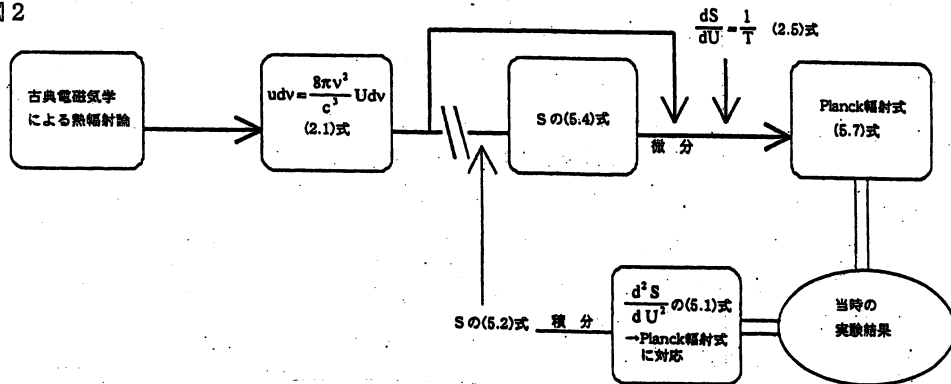


図2は、1901年論文の方法が1899年5月論文の場合(図1)と類似な形になることを示している。

5.4 1901年論文の方法と1899年5月論文の方法

1899年5月論文で、Planckが共鳴子エントロピー S の表式(2.4)を、当時、実験的に信頼できると考えられたWien輻射式(2.7)から導出したとすると、彼は、この S を熱輻射理論の中に導入して、 S を導出した計算を逆に辿ることでWien輻射式を導いたのである。また、4.3節で見たように、PlanckによるWien変位則の取り扱いなどに着目するならば、 S の表式(2.4)は熱輻射理論から演繹的に導かれたと考えることはできない。その導出は、1900年3月論文で試みられたが、結果は同じであった。こうして見ると、 S の式の導入は、Wien輻射式を導く必要性から行われたということになる。1899年5月論文でPlanckがとった方法は、実験結果と一致すると考えられた輻射式との一致に重点を置き、その輻射式から導かれる S の式を、熱輻射理論に導入してしまうというものである。

1900年10月論文でPlanckは、Wien輻射式が長波長領域の実験結果と一致しないことを受けて、エントロピー S とエネルギー U との関係に(2.4)の形に代わる新しい表式を与えた。その式から導かれる輻射式は、Rubensの新しい実験結果とよく一致した。そこで、1901年論文になり、Planckは新しい S の式(5.2)に理論的な説明づけを与えた。それは、確率論的考察によって成功したが、彼のそれまでの熱輻射理論から導かれるものではなかった。つまり、 S の式のための説明の導入は、1900年10月論文で示された新しい輻射式を導く必要性から行われたということになる。Planckがとった方法は、1900年10月論文で得られた、実験結果と一致する式の説明を重要視し、その説明を、古典論にもとづく電磁的な熱輻射論との不整合にもかかわらず、理論の中に導入してしまうというものである。

1899年5月論文と1901年論文の方法を比べて考えると、両方法とも、論文に先行して、実験結果と一致する輻射式が存在し、それに合うエントロピー S の表式を理論の中に導入して、その S から輻射式を導くという形をとっている。導かれた輻射式は、当然、先行して存在したのと同じであり、実験結果をうまく再現している。これらは、 S の式を鍵にして、実験結果に最も合う輻射式を、論文の結論にするというものである。両論文の方法は、図1と図2で示したように、その形が同様に描かれることもさることながら、このような共通した目途をもっていたと考えられる。

6 Planckの熱輻射研究の方法

6.1 Planckの方法の考察

1899年5月論文は、1897年から1898年にかけてPlanckが発表した同題の4論文⁵²の集大成である。また1901年論文は、1900年初頭から顕在化した長波長領域の実験結果に対応した、Planckの新しい熱輻射理論の集大成である。二つの論文は、1890年代後半を通して彼が行った熱輻射研究の典型例と見ることができる。そして、上で示したように、二つの論文上で展開された方法は共通していた。

Planckの方法の手順は次のようなものである。まず、共鳴子と輻射場による電磁気学的理論を展開し、輻射場のエネルギー密度 u と共鳴子のエネルギー U の関係式(2.1)を求める。それから、実験結果とよく一致する輻射式に対応して共鳴子エントロピー S を導く。そして、 S の式が電磁的理論から得られないにも拘わらず、熱輻射理論の中に S を導入する。さらに、 S と温度 T の熱力学的関係式(2.5)と S の式を使い、 U と T の関係式を導く。その式と u と U の(2.1)式を使い、最終的に、 u と T の関係式、すなわちエネルギー輻射式が求められる。こういった手順の輻射式の導き方が、Planckの方法なのである。

⁵²cf. 脚注2

彼の方法は、要約すれば、一方で実験結果に適合するようにエントロピー S を帰納的に求め、他方で S の式から演繹的に輻射式を導くというものである。帰納的側面は、古典論では説明できない当時の新しい実験結果をうまく反映し、演繹的側面は、あくまで結果的にはあるが、古典電磁気学からくる古典論的性質を対応論的に保持する。Planck の研究方法は、このような二面性を、すなわち、古典論に添った演繹的側面と古典論では説明できない内容を取り込む帰納的側面を同時に備えていたのである。このことのために、Planck は古い理論から出発しながらも、新しい量子の世界への橋渡しを発見することができたのである。

6.2 同時期の他の熱輻射研究の方法 (1)

Planck は、熱輻射の研究で帰納的演繹法とも呼べるような方法を用いた。世紀転換期には、Planck 以外の多くの科学者たちも熱輻射研究に関わり輻射式の導出に取り組んでいた。

熱輻射の理論面の研究に関わった科学者には、Lord Rayleigh, J.H.Jeans, H.A.Lorentz らがいる⁵³。Rayleigh は、1900 年の論文「完全輻射の法則についての言及」⁵⁴で、輻射現象を空気の振動のアナロジーから各振動にエネルギー等分配則を適用することで一つの輻射式を導いた。彼の式は、輻射の強さと、温度と波長 λ の関数との次のような関係に基づいていた。

$$\varphi_{\lambda} \propto \nu \lambda^{-4} d\lambda. \quad (6.1)$$

これは、後に Rayleigh-Jeans 輻射式 (R-J 式) と呼ばれる式に即した関係である。Jeans は、1905 年の論文「物質とエーテル間のエネルギーの配分について」⁵⁵で、輻射を気体分子の運動に起因するとし、分子の運動に等分配則を適用し R-J 式を導いた。Lorentz も、1903 年の論文「大きな波長の熱輻射線の金属による放出と吸収について」⁵⁶で、輻射現象を電子の運動に起因するものとみなし、等分配則を電子の運動に適用することで R-J 式を求めていた⁵⁷。

三者の輻射式はいずれも、仮定した物理モデルにエネルギー等分配則を適用することによって導かれている。彼らの共通した方法は、Planck が用いたような帰納的側面を持たず、終始、古典論に基礎をおいた演繹的方法だった。そのため、彼らが導く輻射式は、古典論的極限である長波長領域でしか実験結果と一致させることができなかった⁵⁸。短波長領域に有効な輻射式を演繹的に導くには、量子概念が認識される必要があった。量子概念を欠く古典論に基づく演繹的方法では、全波長領域で実験と適合する式は導出できなかったのである。Planck の方法で、それが実現できたのは、彼の方法がエントロピー S に関する帰納的側面をもっていたからである。

⁵³W.Wien は、1896 年以後、ベルリンの帝国物理工学研究所からアーヘンの Polytechnische Hochschule に移った為か、熱輻射研究の第一線から離れたので、ここでは挙げなかった。しかし彼の名は、1890 年代を通して、理論・実験の両面で熱輻射の研究に最も貢献したビッグネームであることに変わりはない。

⁵⁴Lord Rayleigh, Remarks upon the Law of Complete Radiation, *Philosophical Magazine* 49, pp.539-540, 1900.

⁵⁵J.H.Jeans, On the Partition of Energy between Matter and Aether, *Philosophical Magazine* 10, pp.91-98, 1905.

⁵⁶H.A.Lorentz, On the Emission and Absorption by Metals of Rays of Heat of Great Wavelength, *Proc. Amsterdam* 5, pp.666-685, 1903.

⁵⁷この論文で、Lorentz は考察の対象を長波長領域に限った。これは、エネルギー等分配則を輻射に適用するならば、長波長領域にだけ有効な輻射式 (Rayleigh-Jeans 式) が導かれるということを Lorentz が認識していたことを示している。

⁵⁸この不一致の原因を、Jeans は、実験側の問題、すなわち輻射の平衡状態が実現されていないという点に問題があるとした [J.H.Jeans, On the Application of Statistical Mechanics to the General Dynamics of Matter and Aether, *Proc. Roy. Soc. London*, 76, p.296, 1905. ; J.H.Jeans, On the Laws of Radiation, *Proc. Roy. Soc. London*, 76, p.545, 1905.]。しかし、彼の解釈は恣意的なものであった。

6.3 同時期の他の熱輻射研究の方法(2)～実験科学者の場合：Lummer, Pringsheim～

世紀転換期，熱輻射の実験研究に携わった科学者には，O.Lummer, E.Pringsheim などがいる。Lummer は，E.Jahnke の協力のもとに，1900 年の論文「黒体および磨いた白金のスペクトル方程式について」⁵⁹で次のような輻射式を発表した。

$$E_{\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-\mu} T^{5-\mu} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{(\lambda T)^{\nu}}\right) : (\mu = 4, \quad 1.3 > \nu > 1.2). \quad (6.2)$$

ここで C_1, C_2 は定数である。

また Lummer は，Pringsheim とともに 1900 年の論文「長い波長の黒体輻射について」⁶⁰で次のような輻射式を示した。

$$E_{\lambda} = C_1 \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \lambda T \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{(\lambda T)^{1.3}}\right). \quad (6.3)$$

さらに，Lummer と Pringsheim が Planck に宛てた 1900 年 10 月 24 日付の手紙には次のような式が記されていた⁶¹。

$$E_{\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c}{\lambda T}\right) + \exp\left(-\frac{\lambda T}{c}\right) - 1} \quad (6.4)$$

実験科学者たちの輻射式は，見てわかるように，実験結果と比較してべき数に工夫を加えたものである。彼らの方法は，輻射式を自分たちの実験結果に合わせて求める極めて ad hoc なものであった⁶²。Planck も，実験結果と輻射式の関係に目を向けたが，実験結果を即輻射式と結びつけるのではなく，実験結果をエントロピー S の問題として捉えることで理論に組み込み，そこから輻射式を導くという手順を踏んだ。単純な帰納によって経験式を求めた実験科学者たちの方法は，電磁気学と熱力学の理論的枠組みを持った Planck の方法とは異なっていた。

6.4 Planck の方法がもつ意味

Planck の熱輻射研究の方法は，図 1，図 2 から分かるように，一方で実験結果に一致するエントロピー S を帰納的に求め，他方でそのエントロピーから輻射式を演繹的に導くという方法である。その方法は，輻射式の研究に取り組んだ他の科学者のものとは異なっていた。相違点は二つあった。

第一は，Planck がエネルギー等分配則を用いずに⁶³，エントロピー S の式に注目した点である。これは，主に，理論に携わった科学者から Planck を差別化した。彼らは，6.2 節で見たように，エ

⁵⁹Lummer & Jahnke, Über die Spectralgleichung des schwarzen Körpers und des blanken Platins, *Annalen der Physik* 308, SS.283-297, 1900.

⁶⁰O.Lummer & E.Pringsheim, Über die Strahlung des schwarzen Körpers für lange Wellen, *Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges. II*, SS.163-180, 1900. (1900 年 2 月 2 日に報告)

⁶¹この手紙に関しては，天野清『熱輻射論と量子論の起源』(大日本出版，1943)，p.71, H.Kangro, 1970, SS.212-213 が引用している。筆者は，この手紙をベルリンの Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft (in Boltzmannstr. 14, Berlin.) で複写した。

⁶²実験科学者の業績は，輻射式の導出に並んで，実験手段・データの改善にあることはもちろんである。彼らは，より精密な実験を目指し，輻射の線源装置および測定機器，輻射の線種などの研究に取り組んだ。例えば，1898 年に Lummer らは，安定した輻射線源として，生産現場で使用されていた電気炉を輻射実験用に開発した [cf. 兵衛友博「熱輻射論史の実験的側面からの検討 (1) -電気炉の採用-」『19 世紀物理学史研究-その課題と方法-』No.3, 1988.3, pp.44-46. ; O.Lummer & F.Kurlbaum, Der elektrische geglyhte "absolut schwarze" Körper und seine Temperaturmessung, *Verh. d. Phys. Ges. zu Berlin* 17, SS.106-111, 1898.]. また，彼らは 1899 年には，塩化カルウムでつくったプリズムを輻射の線種として使い，波長 18 μ の赤外線にまで測定範囲を広げた [cf. 脚注 33].

⁶³Planck がエネルギー等分配則を避けた理由は，当時，等分配則が "Boltzmann-Maxwell 学説" と呼ばれていたことに関係しているようである。等分配則の背景には気体分子運動論が存在した。Planck は後の回想録で，気体分子運動論などの原子論に対する当時の考えを次のように述べている。"その(原子論に拒否的であった)理由は次のものであった。当時私(Planck)は，エントロピー増大原理を，エネルギー保存原理自体と同等に，普遍に妥当するものとしてみなしていたけれども，Boltzmann は，エントロピー増大原理を，単に確率則として扱っていた。すなわち言い換えれば，例外を認めうる原

エネルギー等分配則を用いて演繹的に輻射式を求めていた。彼らの理論的方法は、完全に古典論に基づいて演繹的であり、長波長領域以外の実験結果と一致する輻射式を導くには有効ではなかった。それに対して Planck は、帰納的にエントロピー S を求めることで当時の実験結果を反映させ、全波長領域に有効な輻射式を導いたのである。

第二は、Planck が実験結果と S の式との対応関係を追求した点である。これは、実験科学者から Planck を差別化した。実験科学者たちは、6.3 節で見たように、輻射式を単純な帰納で求める、極めて ad hoc な方法をとった。それに対して Planck は、実験結果と S の関係に着目して S の式を求め、そこから演繹的に輻射式を得るというアプローチをとった。彼は、実験結果に目を向けたが、即輻射式と結びつけるのではなく、エントロピー S を鍵にして理論的枠組みから輻射式を導いた。

Planck の方法は、世紀転換期の熱輻射の研究において、周囲の他の科学者とは異なる固有なものだった。彼の方法は、古典理論だけに依拠する演繹ではなく、また実験結果からの帰納だけを頼りにするものではない。それは、帰納的であると同時に演繹でもあった。このような方法によって、彼の熱輻射理論は、当時の理論の古典性と実験結果による非古典性の両方を含み、その間に存在するギャップを内に包み込んでいたのである。のちに、Planck の理論を考察した Einstein は、1906 年の論文⁶⁴で、彼の 1901 年論文に潜む問題を暴き出した。それは、1901 年論文の当初の熱輻射理論が、古典電磁気学を基盤として、光の波動性を前提とする一方で、Planck が導入した確率論的考察は光の粒子性に基づくという理論的矛盾であった。これは、まさに Planck の方法が内包していた、古典性と非古典性とのギャップである。

7 まとめ

本論は、まず、1899 年 5 月論文で Planck が導入したエントロピー S の (2.4) 式がどのように求められたのかを問題にした。この問いに対する先行研究は、主に、Wien 輻射式の逆算から得られたという Rosenfeld らの見解と、 H 関数に基づいて求められたという Darrigol の見解の二つに分けることができる。

1899 年 5 月当時の Planck の文脈を彼の諸論文を頼りに検討すると、彼の、Wien 変位則の使い方や引用の仕方に関する事実と、Darrigol の見解との食い違いが明らかになった。それに対して、Rosenfeld らの見解による解釈は、当時の Planck の文脈に反する点がなく、より現実的なものとなすことができた。

そこで本論は、彼らの見解を正しいとする視点から、1899 年 5 月論文の方法を考察した。結果、エントロピー S の (2.4) 式を帰納的に求め、その S から演繹的に Wien 輻射式 (2.7) を導くという方法が読みとれた (図 1 参照)。そして、同形の方法が 1901 年論文でも見られた (図 2 参照)。

1899 年 5 月論文と 1901 年論文は、1895 年～1899 年、1900 年～1901 年のそれぞれの時期にかけて Planck が行った熱輻射研究の集大成であった。その二論文で見られた共通の方法は、Planck の熱輻射研究の方法と言えるものである。

彼の方法は、他の熱輻射の研究者がとったものと異なっていた。その相違点は、二つの点に集約される。

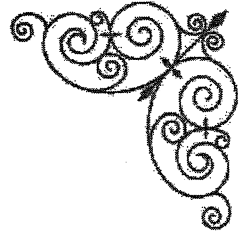
第一は、エネルギー等分配則ではなく、エントロピー S の式に注目したこと、第二は、Planck が実験結果と S の式との対応関係を追求したことである。

理として扱っていたのである。” [M. Planck, *Persönliche Erinnerungen aus alten Zeiten, Vorträge und Erinnerungen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1973, S.13.] こういった見解は、M. J. Klein (1962, pp.464-486), M. Jammer (1966, p.17) にも見られる。

⁶⁴A. Einstein, Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption, *Annalen der Physik* 20, SS.199-206. 1906.

第一の点は、主に、理論に携わった科学者から Planck を差別化した。当時の理論科学者は、実験結果よりも、等分配則を含めた古典論に基づく理論に優位を与える姿勢から抜けられなかった。第二の点は、実験科学者から Planck を差別化した。実験科学者たちは、より精密な実験を実現し、古典論では説明できない結果を提示したが、実験結果から輻射式を導くにあたっては ad hoc 過ぎた。

エントロピー S の式を帰納的に求め、他方でその S から演繹的に輻射式を導くという、Planck の帰納的演繹法は、古典論か実験結果かのどちらかに偏るのではなかった。彼の方法は、当時の理論からくる古典性と実験結果がもっていた非古典性の両方を取り込むものだった。



資料紹介

資料解説

東京第二陸軍造兵廠に対する仁科芳雄の報告：

1943年7月から1944年11月*

山崎正勝[†]、深井佑造[‡]、里見志朗[§]

さきに筆者たちは、表記の文書に短い解説と註を添えたものを、資料紹介「第二次世界大戦期における日本の核研究資料(1)」として本誌前号に掲載した。その後、同文書を保管されている黒田和夫氏から、より鮮明な資料のコピーをいただくことができた。今回の資料解説は、前回、判読不能だった部分などを補い、その後の著者たちの分析結果をもとに、注釈を付したものである。なお、筆者たちの分析の内容については、この号の別掲論文を参照していただきたい。

凡例

1. 原資料の書誌的な状況については、前回の凡例を参照。ここでは、今回の解説に固有のものについてだけ記述した。
2. { }は前回誤って記録した部分を表し、括弧内に今回訂正されたものを示した。
3. []は、前回判読困難だった部分で、今回読みとられた文字を括弧内に示した。
4. 依然として残った1個所の不明部分については、[]内を空白のままにしてある。
5. 旧字または誤字で、資料の文字と同じ印字を用意できなかったものには、それぞれ(旧)および(誤)などを添えた。
6. 著者たちが加えた註は、各頁ごとに(1)、(2)などで示した。
7. 註を付けるにあたって、資料に書かれた物理的内容の誤りに関して、次のようなレベルの分類を行った。
 - (A) 現在あるいは当時の知識の水準から見て、例えば、原爆の動作原理のように、仁科芳雄本人の知識が誤っていたと考えられる事項。
 - (B) 仁科の持っていた知識は正しかったが、原子力や核物理学、化学などの専門知識について全くの門外漢であった軍人たちに理解しやすくする目的で、正確さを犠牲にして説明したと考えられる事項。
 - (C) 仁科博士は正確に物理的内容を説明したが、議事録を記録した者が、仁科の説明を誤って記録したと考えられる事項。
 - (D) 仁科は議事録に目を通していないと思われる。そのため仁科が内容の確認ができなかったと考えられる事項。

*本解説は、山崎、深井が日野川静枝氏とともにはじめた研究会の中で議論されてきたものである。里見は1999年9月から同会に加わった。日野川静枝氏の有益な助言と励ましに感謝したい。また、黒田和夫氏には、資料の鮮明なコピーをお送りいただいたことに深く感謝申し上げる。

[†]東京工業大学社会理工学研究所

[‡]日本大学文理学部講師

[§]東京都立大学理学部物理学科

一、出席者 仁科、信氏(1)、石田(2) 三氏

二、「ウラン」研究ニ関スル事務的事項

仁科

七月(二)日 航本技部長及総務課長ニ呼バレタル所(3)「ウラン」ノ研究ニ関シテハ 安田航本部長ガ航技研長時代 昭一六年頃ヨリ仁科氏ニ依託セル関係モアリ(4) 現在第一航技研ニ於テハ発動機ニ関シ航三研ニ於テ(ハ)爆薬トシテ 又第六航研[ト]{シ}テハ燃料[ト][シ]{テ}研究ヲ依託シ度キ希望[モ]{アリ} 之等ヲ綜合シ航本一本トシテ研究依託セバ効果アルベシトノ見地ヨリ斯様ニ要望{サ}{レ}アリ(5) 其ノ際東二造ヨリ研究依託アルコト其ノ経緯ニ関シ話シオキタリ尚(兵政本)総務部長ヨリ理研所長宛研究依託ノ書類受領シアル旨話シタル所 前記主旨ニヨリ航本ヨリ兵政本へ連繫スル旨話アリタルモ未ダ之ガ返事ナシ(6)

(以上 1 頁)

(1) 当時、東京第二陸軍造兵廠研究所長であった信氏良吉少将である。なお、前回は「東二造」の名称を、陸軍東京第二造兵廠と誤って記載した。東京第二陸軍造兵廠は 1940 年 4 月 1 日に陸軍造兵廠火工廠の改称で生まれた組織で、火薬など化学関係の研究と製造にあたった。東京第二陸軍造兵廠研究所の前身は、火工廠研究課を 1937 年 8 月に分離独立して新設された陸軍造兵廠本部直轄の東京研究所で、火工廠の改称とともに東京第二陸軍造兵廠の管下に入った。信氏は 1943 年 12 月 3 日に東京第二陸軍造兵廠長、44 年 6 月 27 日に中将に昇格している(外山操編『陸海軍将官人事総覧(陸軍篇)』芙蓉書房 1981 年および長谷川治良編『日本陸軍火薬史』桜火会 1969 年)。

(2) 同造兵廠研究所の石田栄技師。終戦時には、同造兵廠附勤任技師(研究所服務)となっている(『日本陸軍火薬史』)。なお、「三氏」という記述は、この資料がここに記載されている三名以外の人物によって記録された事実を示唆するが、確定できていない。

(3) 1943 年のはじめに陸軍航空本部(本文中では「航本」)の総務課長の川島虎之輔大佐は、東條英機首相兼陸軍大臣から呼ばれ「米独で原爆製造計画が相当に進んでいる。遅れたら戦争に負ける」と開発の指示を受けた(読売新聞社編『昭和史の天皇 4』読売新聞社 1968 年)。これは安田武雄中将(当時、第一航空軍司令官、のちの航空本部長)が行った進言の結果であった。防衛庁防衛研究所が所有する安田武雄の回想によると、東條英機への進言は 1942 年のはじめと 1943 年 3 月の二度にわたって行われている(防衛庁防衛研修所戦史室編『戦史叢書 本土防空作戦』)。なお、回想文書が未公開のため、進言経過の詳細は不明である)。川島は、安田(1943 年 5 月 1 日より航空総監兼航空本部長)から、技術担当として航空本部技術部長(本文中では「航本技部長」)の谷口初蔵少将を推され、両人は理化学研究所の仁科を訪問した(『昭和史の天皇』)。ここで言われている 7 月 2 日は、仁科の方が反対に航空本部に川島を訪ねたものなので、二人の仁科訪問は、それより前に行われたことになる。川島、谷口の下で航空本部技術部航空機課の小山健二少佐は、仁科に相談を受けながら計画の具体案を立案した。小山は、仁科の頭文字から計画を「二号研究」と命名した(同上)。

(4) 日本の軍事的な核開発は、1940 年 4 月に陸軍航空技術研究所長安田武雄中将が部下の鈴木辰三郎大尉に原爆の可能性の調査を指示したことに始まる(『昭和史の天皇』)。鈴木は、東京帝大理学部の嵯峨根達吉に相談し、その夏に約 20 頁の報告書をまとめ、各方面に配布した(同上および鈴木辰三郎「原爆製造計画の思い出」防衛庁陸上自衛隊『化学学校記事』第 7 号 1963 年)。これを受けて

安田は1941年6月に、理化学研究所の大河内正敏に研究依頼を行った(安田武雄「原子爆弾製造に関する研究の回顧」『原子力工業』1955年7月号)。

(5) 第一陸軍航空技術研究所(本文中では「第一航技研」と略記)は、航空機の機体を中心とした研究を行っていた。第三陸軍航空技術研究所では、爆薬の研究などが行われた。核兵器の「発動機」、「爆薬」としての研究が、それぞれ第一、第三航技研で行われたという記述は、内容的にそれぞれの研究所の目的に対応している。第六陸軍航空技術研究所では、主に金属材料と燃料の研究が行われた。ここの「燃料」という表現は、おそらく核燃料としてのウランを指すのであろう。これらの研究所は、ともに立川に置かれていた(防衛庁防衛研究所図書館史料閲覧室所蔵、(航空本部)総務課「航空技術報告書綴」(航空本部技術部)文庫袖340および『戦史叢書 陸軍航空兵器の開発・生産・補給』339-340頁)。

(6) 「兵政本」は、陸軍兵器行政本部のことである。陸軍兵器行政本部は1944年の7月以降、ウラン資源探査に対する責任を負った(山本洋一「日本原爆の真相」『大法輪』1953年8月号および同『日本製原爆の真相』創造1976年)。陸軍兵器行政本部は、これよりさきに傘下の東京第二陸軍造兵廠研究所で独自に核エネルギーの利用可能性について検討を行い、1943年4月に2ヶ条からなる「実用化ニ對スル総合意見」をまとめた(黒田和夫氏所蔵「ウラン(U)ニ就テ」東二造研究所(昭和18年4月))。この時、陸軍兵器行政本部と東京第二陸軍造兵廠は、理化学研究所と陸軍航空本部の以前からの関係を知らずに、理化学研究所に研究委託を行った(山本洋一「原子力兵器の研究経過」、日本兵器工業会編『陸戦兵器総覧』図書出版1977年)。この状況に対し、航空本部に窓口を一本化することを理研側としても望んだものと思われる。

航本トシテハ完成セバ必要ナ個所ニテ利用サルハ随意ニシテ(現在海軍ニ{テ}ハ申出アラス(1))要ハ能率的{ニ}一日モ早ク研究ヲ完成スルニアルトノ見解ナリ

従而 仁科トシテモ航本一本トシテ受託スルガ好都合ナリ

(信) 東二造大島ヨリ依託セルモノハ(2){已}ニ事務的手{續}完了シアルヲ以テコノ儘トサレ度(費用二〇〇〇円送付済)(3)

(仁) 航本ト相談ノ上返事ス

(信) 本年度ハコノマ{ト}トスルモ航本ト連繫ヲ密ニシ研究状況ヲ

聴取スル如クス 但シ直接連絡シタキ事項ハ仁科ニ連絡ス

来年度ヨリ研究依託ヲ遠慮ス

研究員ノ問題ハ如何

(仁) 航{空}ヨリ将校二名通勤シアリ(4)

(信) 爆薬並ニ動力ニ利用ノタメ現在ニ於ケル研究ニ差アリヤ

(仁) 差無シ 但シ後ニ至リ利用研究ニ進マバ差ヲ生ズ(5)

(以上2頁)

(1) 海軍技術研究所電気研究部では、1942年7月に伊藤庸二が中心となって仁科芳雄を委員長とする物理懇談会を発足させ、核の軍事的な利用法について検討を重ねたが、「今次戦争では米国と雖も実現することはない」という結論を下し、1943年3月に懇談会は解散となった(志賀富士男編『機密兵器の全貌 わが軍事科学技術の真相と反省(II)』興洋社1952年および河村豊、山崎正勝『科学史研究』vol.37(1998),163-171)。これにともない仁科も海軍の研究から離れた。海軍ではこれとは別に、1942年秋に艦政本部から直接に京都帝国大学の荒勝文策に研究依頼を行った(『昭和史の天

皇』)。「F 研究」と呼ばれた荒勝グループの計画は、戦後の米軍への報告書では 1943 年 5 月から開始されたことになっている(日本科学史学会編『日本科学技術史体系』第 13 巻・物理科学 第一法規出版 1970 年、468 頁)。

(2) 当時、東京第二陸軍造兵廠長であった大島駿中將である。大島は陸軍造兵廠火工廠忠海兵器製造所の初代所長で毒ガス兵器の研究者であった(『陸海軍将官人事総覧』および『日本陸軍火薬史』)。

(3) 理化学研究所に保管されている仁科研究室の昭和 18(1943) 年度決算書には、東京第二陸軍造兵廠からの収入として 2,000 円の記載が残されている。日野川静枝氏の調査と好意による。

(4) 石渡武彦中尉と木下利貞中尉の二名である。

(5) この記述は、この段階で仁科が、核連鎖反応の動力的な利用と爆弾としての利用とを明確に区別していなかったことを示している。この時の仁科の「爆薬」と「動力」の理解については、本資料 5 頁の註(3)を参照。

三、「ウラン」ニ関スル技術的事項

仁科ノ説明セシ事項

1. 「ウラン」ヲ実用スルコトハナレバ大仕掛ノ工場ヲ必要トス
2. ウラン二三五ト二三八ノ分離 (誤) ニハ「ウラン」ヲ弗化物トシ長サ五米ニ重管(管ノ間隔二耗)ノ間ニ之ヲ填(旧)実シ内管ノ内部ハ摂氏四〇〇度ニ平均ニ加熱スル必要アリ 之ガ為ニハ「ガス」デハ流速ヲ著大ニスル必要アリ実行困難ナリ

第 1 図

從テ電熱ヲ要スルコトハナリ 之ニ{ハ}莫大ノ電気ヲ食フ外管ノ外部ハ水冷ス コノ際対流(弗化物ハ揮発性大ナルモノナリ)ヲ生ジ輕キ U ハ上部ニ重キ U ハ下部ニ來ル カクシテ分離 (誤) セル輕キ弗化物ハ U トシテ又{ハ}酸化物トシテ実用ニ供ス U 弗化物ハ揮発性大且湿気ニテ加水分解サルヲ以テソノマ{ハ}ハ実用ニ適セス(1)
(以上 3 頁)

(1) ここに述べられているのは、当時、理化学研究所で竹内証が研究開発を進めていた熱拡散法によるウラン濃縮法と、その装置である。竹内の実験ノートの記述では、装置は高さ 4,996mm の二重の銅製のパイプであった。外径が 36mm の内管は、内部を電熱線で加熱され、2mm のギャップを挟んで外管があり、周りは水で冷却されていた(『日本科学技術史大系』446 頁)。第 1 図は、竹内のノートの記述によく一致している。この点については、竹内証氏ご本人から、確認をいただいた。

3. [二三五][ノ] U{ヲ}利用スル理由

U_{235} {ハ}中性子ノ速度小ナルモ分裂崩壊{壊}シ連鎖的ニ次々ヘ進ムモ

U_{238} ノ方ハ大ナル速度ノ中性子ノ衝突ヲ必要トス

從而分裂崩壊{壊}セシムルニ困難ナリ(1)

4. U ヲ爆薬トシテ利用スル際水ヲ必要トスル理由

U ノ[第]二次的ニ放出セル中性子ハ水分子ニ衝突シ H ヲ

遊離(誤)セシムルト共ニ速度ヲ小ナラシムル[ニ]作用ス(2)

5. U ヲ実用スルニ基本重量 10kg ヲ常ニ存置セシムルヲ

要スル理由

U10kg 以下ニ於テ{ハ}放出サレタル中性子ハ自然ニ消滅シ連鎖

反応ヲスルニ至ラズ(3)

之ガ為 本一〇Kニ追加セル U ノミガ實際ノ働(外界ニ作用スル

「エネルギー」)トナル(4)

6. U ノ放出スル「エネルギー」

(以上 4 頁)

(1) 現在の知識では、天然ウランによる高速中性子連鎖反応は起こらないことが分かっている。高速中性子の連鎖反応が実現するウラン 235 の濃縮度の限界は、 $5.56 \pm 0.02\%$ で、この値以下の濃縮度では臨界にならない(H. C. Paxton and N. L. Pruvost, *Critical Dimensions of Systems Containing ^{235}U , ^{239}Pu , and ^{239}U* (1986 Revision), LA-10860-MS (1987) p. 42)。当時は核断面積の知識が乏しかったので、このタイプの反応の持続可能性を明確に否定することができなかつたため、「困難ナリ」という表現になったのだろう。竹内証の戦中のメモにも、高速中性子連鎖反応で、天然ウランに対する U_3O_8 の臨界量が 40 トンであるという記述が見られる(竹内証のノート。1998 年 2 月 13 日付け竹内証から山崎正勝への手紙にコピーが添付されている)。

核分裂反応で発生するエネルギー 2Mev の中性子によるウラン 238 の核分裂断面積は 0.55 バーンで、ウラン 235 の核分裂断面積 1.3 バーンに比べて極端に小さいというわけではない。ところが、同じエネルギーの中性子による天然ウランの非弾性散乱断面積は 3 バーンで吸収断面積の 0.58 バーンに比べて大きい。そのため、核分裂で発生した中性子が天然ウランに入射すると、非弾性散乱を受けやすく、減速してエネルギーが低下する。ウラン 238 の核分裂のしきい値は 1Mev 付近にあり、中性子のエネルギーが 1Mev に低下すると、ウラン 238 の核分裂断面積は 0.015 バーンまで低下する。このように、核分裂のしきい値付近の非弾性散乱と分裂現象に対する検討が問題になる。当時、彦坂忠義がウラン原子核内の核構造に関連して検討を行ったのも、この問題を念頭においたものであると思われる(彦坂忠義「原子核エネルギー利用の一方法に就いて」1944 年 11 月学術研究会議原子核分科会発表、1945 年 5 月提出)。

(2) ここに記述されているのは、軽水による中性子の減速の過程である。

(3) これはウランの臨界量の記述となっている。ここに示された 10kg という数値は、竹内証の実験ノートの記述に見られる、10% のウラン 235 を含む濃縮ウラン 10kg の臨界量に相当する(『日本科学技術史大系』446 頁)。本資料 18 頁に、より詳しい仁科の説明がある。

(4) 10kg の臨界量を上回った場合に反応が進行し、エネルギーが放出されることが述べられている。

$\text{U}_{\{235\}}$ ヲ一〇 K ニ水三〇 K ヲ加ヘタモノハ 石炭一万トンノ熱量「ガソリン」

一〇〇〇トンノ熱量ニ相当ス(1)

7. U ノ実用効果

U_{235} ヲ発動キニ利用スルニハ発動キノ構造ヲ全ク変更スルヲ要スル關係上 直チニ実用化ハ困難ナルモ(2) 爆薬トシテノ利用ハ頗ル容易ナリト認メアリタルモ 前述セル如ク基本葉量 10kg ヲ常ニ余分ニ必要トスルヲ以テ 爆弾トスル場合過剰ノ 10kg ヲ損失スルコトナル關係上 爆弾トスルコトハ不得策トスル目下ノ見込ナリ更ニ爆弾トスルコトノ不得策ナル理由ハ U_{235} ガ水ヲ分解シ爆発威力大ナル成分温度トナス為ニハ 1/20 乃至 1/30 秒ノ時間

ヲ要シ 從テ之ヲ保持スルニ強カナル「ボムブ」ヲ必要トス 即チ「ボ{ン}ブ」ノ重量甚大ナルモノトナルヲ以テ適當ナラザルベシトノ見解ナリ(3)

8. U_{235} ヲ分裂崩壊セシムル原動力

「ラテウム」ナルモ「ベリリウム」「ポロニウム」ニテモ可ナリ

(以上 5 頁)

(1) ここに示された数字は、10% の濃縮ウラン 10kg に含まれる 1kg のウラン 235 がすべて核分裂を起こしたと仮定した時のエネルギーであると思われる。陸軍航空本部に提出された報告書に関する別の文章では、黄色火薬 18,000 トンとなっている(安田武雄「日本における原子爆弾製造に関する研究の回顧」)。しかし、石炭の燃焼熱は、同じ重さのガソリンのそれに対し半分強程度なので、ここに示されている二つの数値の間には、そもそも当量関係が成立していない。分かりやすくするために TNT 換算で表し、1kton を 1,012 カロリーであるとして(S. Glasston et al ed., *The Effects of Nuclear Weapons*, US Department of Defence, 1977)、石炭 1 万トンとガソリン 1,000 トンの TNT 換算値を求めると、それぞれ 50 ~ 80kton、10kton となり大きな開きがある。ここで石炭とガソリンの燃焼熱を、それぞれ 5,000 ~ 8,000cal/g、10,000cal/g とした(東京天文台編纂『理科年表』丸善)。1kg のウラン 235 に対する実際の TNT 換算量は約 18kton であるので、石炭の値はおそらく間違いだろう。

(2) 仁科はウランを爆発以外に利用することを、「発動キ」や「動力的」という言葉で表している。これは現在の原子炉に相当するが、当時はまだ「原子炉」という術語は存在していなかった。術語「原子炉」は昭和 21 年 8 月号『科学朝日』の記事から始まっている(深井佑造『日本原子力学会誌』37、309 (1995))。しかし、この言葉は便利なので、以下では「原子炉」を使用することにする。

(3) 「爆薬トシテノ利用ハ頗ル容易ナリト認メアリタリ」の発言は、熱中性子を利用することで爆弾が可能であると仁科が考えていた事実を示している。これは冒頭に示した注意事項 (A) に属する問題と思われる。「基本薬量 10kg ヲ常ニ余分ニ必要トスルヲ以テ爆弾トスル場合過剰ノ 10kg ヲ損失スルコトトナル関係上」の文章から、仁科が臨界量の 2 倍程度の装荷量を持った体系を爆弾として考えていたことが分かる。また、仁科が技術的な理由をあげて、爆弾として使用することに対して「不得策」という表現で疑問を呈していたことは注目されてよい。

そのあとの「爆発威力大ナル成分温度トナス為ニハ 1/20 乃至 1/30 秒ノ時間ヲ要シ」という部分には注釈が必要である。仁科が問題にしているような体系では、中性子サイクル時間は、核分裂反応で発生した高速中性子が熱中性子に減速され拡散する時間が加わり、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 秒である。もし、これと比べ比較的長い「1/20 乃至 1/30 秒」という時間にわたって反応を持続できるような、「(体系全体を)保持スルニ強カナル「ボムブ」(この場合、爆弾の容器のこと)」が製作できれば、航空本部に報告したような 20kton 程度の核エネルギーの蓄積が可能であると考えたのであろう。しかし、現実には熱中性子による連鎖反応によって、仁科が期待したような規模の爆発を起こすことはできない。「1/20 乃至 1/30 秒」の間、たとえ体系が保持されていたとしても、核分裂反応によってウラン 235 が減少し、体系は臨界状態から逸脱して連鎖反応は停止する。その結果、そのような大量のエネルギー蓄積は不可能となるからである。この時の爆発力は、開発目標の約 200 分の 1 以下の性能しか示さない。この点に関する詳細は、本誌の別の論文に述べられている。(本号 1 頁深井論文および 25 頁山崎論文。なお、爆弾の装荷量から反応時間を計算したと見なすこの点の理解について、共著者の里見は意見を保留している。)

「ベリリウム」ニ中性子ヲ衝突セシムレバ「ポロニウム」ヲ生ズ(1)

ポロニウムノ生存ハ約一五八日ニシテソノ半減期ニ之ヲ補ヘバ可ナリ

9. U 資源

大東亜共栄(圈)ニ目下{ハ}少キモ 朝鮮(異字体)ノ「ピッチブレンド」ハ見込アリ(2)

10. 中性子発生装置

直径一・五米 マグネット二五〇トンノ{該}装置運{轉}中ナルモ

未ダ完成セズ 所要資材ガ軍需ニ廻ル為[]々進捗セズ(3)

本装置完成セバ各種ノ重要ナル仕事ヲナシウルモノナリ

米{口}ニ於テハ目下之{ノ}十倍モノヲ計画シアリト云{フ}モ完成セルヤ

否ヤ不明ナリ

(以上 6 頁)

(1) <「ラジウム」、「ポロニウム」から発生する α 線を「ベリリウム」に衝突せしむれば中性子を生ず>となるべきで、この誤りは、冒頭に示した注意事項 (C) で、注意事項 (D) の事実があれば防げたはずである。

(2) 朝鮮の菊根鉱山で産出されたのはピッチブレンドではなく、フェルグソン石である(畑晋、新美幸親「朝鮮海面産フェルグソン石」『理化学研究所彙報』20 輯 11 号 1942 年 1159 頁)。川島虎之輔は、この打ち合わせが行われた翌日の 7 月 7 日に、ピッチブレンド鉱石をチェコスロバキアから日本へ輸入する可能性を調査しよう大島浩ドイツ駐在大使に打電している。

(3) ここで問題にしている理研の中性子発生装置とは、電磁石の直径が 60 インチの大型サイクロトロンのことである。電磁石は 1938 年 3 月に輸入され、6 月に東京石川島造船所で加工されて翌年理研の現地で装置全体が組み上がり試験調整に入ったが、予定した特性が得られず、大改造されることになった。問題は 3 点あった。第 1 は電磁石の磁場の不均一性で、これについては、1940 年に渡米した所員が、同じ規模の装置をすでに建設していたカリフォルニア大学から情報を得て、設計変更した。第 2 は真空度の低下であったが、真空ポンプを輸入することによって解決された。最後の問題は、半円型空洞電極 (Dee) に印加する大容量高周波の電源が入手できなかったことであった。これは最後まで解決せず、所期の特性は未達成のまま終戦となった(新聞啓三、山崎文男、杉本朝雄、田島英三『科学研究所報告』第 27 輯 第 3 号 156 頁 1951 年 6 月。この文献には大型サイクロトロンの建設状況が詳しく報告されている。日野川静枝『東京工業大学人文論叢』、no.6、1980、p.140 も参照)。

「所要資材ガ軍需ニ廻ル為」とあるが、たとえば東芝の通信機部門で見ると、1943 年の時点で理研のような民需向けの生産高は、全体のわずか数 % にしかすぎなかった(ダイヤモンド社制作『東芝百年史』東京芝浦電気株式会社<非売品>1977 年 47 頁)。

仁科研究室ニ於ケル U 研究状(旧)況(昭和一九年二月二日)

一、出席者

仁科博(誤)士

信氏少{將}

石田技師

二、研究進捗状(旧)況(仁科博(誤)士説明)

1. ウランノ弗化物製造

目下研究中ナリ 本邦ニ於イテハ未ダ之ガ研究ナキ{爲}困

難シアル現況ニシテ 弗素ノ製造ニ関シテハ一昨年十一月頃ヨリ
研究ヲ始め(1) 東北帝大青山教授石川教授其ノ他ノ援助ヲ受
ケ 漸ク昨年八月頃ヨリ純{粹}ノ弗素ヲ製造シ得タルモ(2) 更ニ進
ンデウランニ該弗素ヲ作用セシメ ウラン弗化物ノ製造ヲ行ヒタルモ
ウラン弗化物ヲ未ダ得ルニ至ラズ 之ハウランハ酸化シ易キ{爲}酸
化ウランガ表面ニ出来 弗素ト反{應}ヲ妨グルモノナルコトヲ知ル
ウランハ酸化ウランヨリ電解法、テルミット法ニテ得アルモ尚純{粹}
(以上 7 頁)

- (1) この研究を担当した木越邦彦は、1942 年 10 月に理研に着任している。
- (2) 東北帝国大学金属材料研究所低温物理部の青山新一教授と同理学部化学教室化学第一講座の石川総雄教授である。木越の回想には、同金属材料研究所低温化学部の神田英蔵教授の名前も出てくる(『昭和史の天皇』105、107 頁)。神田は青山とともにフッ素の研究を行っていた。木越が仙台に石川を訪れたのは 1943 年 5 月で、その後、酸性フッ化カリの熔融電解によってフッ素ガスを得ている(木越邦彦『『日本の原爆』製造実験挫折ノート』『宝石』1974 年 9 月号)。

ノウランヲ得ルコトニ苦心シアリ

従ツテウラン弗化物ハ未ダ得ラザル現状(旧)ナリ(1)

2. ウラン弗化物分離器(旧)

目下製作中ニシテ概(旧)ネ完成シアリ

{氣}密ヲ要スル閥{系(ママ)}上{眞}鍍{鍍(誤)}ヲ使用シアルモ{眞}鍍{鍍(誤)}ハ加工難(旧)

シキモノナル{爲}小孔ヲ生ジ困難(旧)シタルモ漸ク出来上リタリ 普通ノ半

田{鍍(誤)}ハ弗素ニテ腐蝕サルルヲ以テ使用シ得ズ

3. 中性子発生装置(旧)置

高周波発生用{眞}空管ノ上等ノモノ得難(旧)ク即(旧)チ現在使用

セルモノハ電圧ヲ高メル場合グリッドトフィラメントガ接{觸}シテ{毒}

命短ク{従}ツテ高周波ノ程度低キノモニシテ実験シアル閥

{系(ママ)}上{輕}イ水素ノ発生少キ嫌(旧)アリ強(旧)度ノ中性子ヲ沢山発生

セシムルニハ高周波発生用{眞}空管ノ強(旧)カナルモノヲ必要トスルモ入手

シ得ザル状(旧)況ニアリ(2)

三、質{議(ママ)}{應}答

(以上 8 頁)

(1) 木越がウランを得た方法は、緑色の陶器釉薬に使用される硫化ウラニルを集め、それとフッ化カリウムから四フッ化ウラン複塩を作り、これに食塩を加えて電解法で金属ウランを得るという方法であった。こうして作られた金属ウランと電解法で得たフッ素を直接反応させたため、1943 年 8 月に爆発事故を発生させた(木越邦彦、前掲)。

(2) 高周波用真空管は、はじめは東京電気無線株式会社のサイモトロン SN-168 が使用され、のちに日本電気株式会社の TW-530-B に変更になった。ここに述べられている「上等ノモノ得難ク即チ現在使用セルモノ」が、いずれを指すのかはこの文章だけでは不明であるが、『科学研究所報告』に述べられている建設状況から、TW-530-B であると判断される。すなわち、1943 年 11 月頃には TW-530-B によって高い高周波電圧が得られるようになり、予備調整として「輕イ水素」(陽子)による加速実験が実施されるようになった。12 月 8 日には蛍光板で高速度 (9MeV) の陽子ビームがわず

かに確認された。この状況が「軽イ水素ノ発生少キ嫌アリ」という記述となったと考えられる。その後、1944年1月以降にイオン源の調整を行っている(『科学研究所報告』169頁)。この時期に、仁科がさらに「強力ナルモノ」の必要性を感じていたことは、1944年1月11日付けの仁科から国際電気通信株式会社の加藤安太郎工務部長への手紙で「…住友電気通信株式会社製 TW-530-B 真空管を以てしては所要電力に相当の不足を来し候こと最近判明し」と、より大容量の高周波用真空管の開発を希望していることから分かる(日野川静枝『東京工業大学人文論叢』p. 154)。このような時間の経過に沿った比較検討により、ここでの記載は他の資料の内容と矛盾していないことが分かる。

(信氏) 分子崩壊ガ連鎖反{應}的二行ハルル{爲}ニハ常ニ{一〇}Kノウランヲ余
分ニ必要トスルモノノ如クナルモノ際{一〇}Kノモノ迄モ連鎖反
及{バ}ザルヤ
(仁科) 動力的二徐々ニ行ハザル場合ニ於イテハ{一〇}K{ノ}分迄モ連鎖反
{應}スルコトナシ
計算ニ依ルトエネルギー発生セシムルニハ徐々ニ行ナハシムルガ良シ
ト思ハル 即(旧)子反{應}ノ{爲}発熱ヲ伴ヒ膨張シ{従}ッテウランノ濃度
ヲ低下スルコトナル 濃度薄(誤)クナレバ反応ガ止マル迄ニナルノデ
ハナイカ
然ル場合温度低クナリ再ビ濃度ヲ増ス関係(ママ)上反{應}行ハル(1)
以上ハ理想的ノ場合デアッテ實際ハ未ダ不明ナリ
兎ニ角 実験ヲヤル必要アルヲ以テウラン化合物ノ分離実験
ニノミ捕ハルコトナク之ト同時ニ各種ノ実験ヲ進ムル意向ナリ
(信氏)其ノ実験ニ用フルウランハ如何ニスルヤ
(以上9頁)

(1) この記述から、仁科の原子炉の動作の概念を知ることができる。仁科は連鎖反応の激しさの程度として定性的に「反応度」という術語を後の文中に用いているので、ここでは「反応度」を用いて仁科の原子炉の動作を説明する(18頁第5図)。仁科が考えていたのは、

「反応度」増加 → 核分裂による発熱 → 温度上昇 → 反応系膨張 → ウラン濃度低下 → 「反応度」減少 → 発熱量低下 → 温度低下 → 反応系縮小 → ウラン濃度上昇 → 「反応度」増加 → …

という負の反応度温度係数の存在による自己制御性のある体系である。しかし、この仁科の説明の中にある、「反応系の膨張・縮小でウラン濃度が低下・上昇」という理由は、この現象の物理的説明になっていない。「ウラン濃度」は「反応系の膨張・縮小」には無関係だからである。

現在の原子炉物理学の知識では、負の反応度温度係数を、次の物理的現象から説明している。(i) Uの核分裂断面積は熱平衡エネルギー領域の中性子に対しては $1/v$ 法則に従う。したがって、体系温度が増加すれば熱平衡状態の中性子の平均速度が増加し核分裂の割合が低下する。(ii) 反応系温度が上昇して膨張すれば、体系の平均密度が低下して中性子が体系の構成物質の原子核に衝突する割合が低下して体系から漏れやすくなる。これは反応度を低下させる。この際、体系を収納した容器も膨張して表面積を増加させ中性子の漏れを低下させるように作用するが、その割合は体系の体積膨張での割合を超えることはない。(i)を「断面積変化」、(ii)を「密度変化」と呼んでいる。

仁科の考え方は(ii)の場合に相当する。(i)の「断面積変化」による自己制御性の連鎖反応の実現についての方法は、F.PerrinとF.Adlerらにより、すでに提案されていた(F. Perrin, *Com. Ren.*,

208, 1573 (1939), F. Adler and H. von Halban, *Nature*, no. 143, 793(1939)). そこで示されているのは、非 $1/\nu$ 法則の吸収断面積を持つ Cd を連鎖反応体系に混入することによって、自己制御性を持たせようとする方法である。このような連鎖反応の自己制御性の可能性を、仁科は知っていたと思われる。しかし、仁科のような (ii) の考え方は、この時期に他では発表されていないので、むしろ、これは仁科の独創性と評価できると思われる。

また、仁科の考えは戦中に米国で開発された高い自己安定性を持つ water boiler 型の原子炉の特性にも似ている (S. Glasstone, *Principles of Nuclear Reactor Engineering*, D. Van Nostrand co. (1955) および金関義則、野上耀三、服部学訳『原子力ハンドブック原子炉編(下)』商工会館出版部 1956 年 930 頁)。はじめの water boiler 型原子炉 LOPO は、1944 年 5 月に LASL で臨界になった。この時期は日米間の情報交流が断絶しているため、仁科の考え方はこれとは独立であったと考えられる。この型の原子炉の主な出力制御法はポロンカーバイド製の熱中性子吸収棒の引き抜き・挿入によるが、体系内燃料溶液の温度上昇に伴う膨張で、一部の燃料溶液が体系容器から溢れ出すことによる反応度低下で出力の安定を図っている。

一方、連鎖反応体系の「反応度」に対して「ウラン濃度」は最適値を持つという物理的現象について、仁科の下にいた皆川理・玉木英彦や竹内証から聞いていたであろう (皆川理・玉木英彦『日本数学物理学会誌』14,106 (1940) および竹内証『日本科学技術史体系』)。したがって、「ウラン濃度の低下・上昇」が「反応度」の減少・増加に直接比例しないことも十分に理解していたはずである。このことから、ここの仁科の説明は、次のように解釈できる。通常の化学反応では、一般に濃度により反応の激しさが左右される。そこで、素人の「東二造」の軍人に分かりやすく説明するために、化学反応になぞらえ、「ウラン濃度の低下・上昇」という表現を用いたということである。これは冒頭に示した注意事項 (B) に属する表現である。

(仁科) 自然ニ存スルマノモノヲ使用スル考ナリ 此ノ中ニハ U_{235} ヲ約〇・七
%含ミアリ。尤モ爆発現象ヲ起スコトナキモ中性子ヲ{當}テレバ反{應}

ノ状(旧)況ハ正確ニ獲ルコトガ出来ル

外國デハ例ヘバ佛國デハ{已}ニウラン三〇〇K位モ使用シテ実験成績(ママ)ヲ
得テオリ米國デハソレ程使ハナイガ各種ノ実験ヲヤリアリ(1)

(信氏) 爆薬ニハエネルギー源ノウラン一〇Kモ使ハルルコトトナルモ
発動機ナラバー〇Kハ保存サレル理ト承ル

(仁科) ウラン一〇Kガ爆発シナクテハ爆薬トシテノ利用ハ出来ヌ

(信氏) 液体酸素ヲ爆薬トシテ{戰}場デ使用スルニハ相当強(旧)度大ナルボ
ンプヲ必要トスベク ウランノ場合ニ於イテモコノ程度ノポンプヲ必要ト
セン(2)

(仁科) ソノ通りト思フ ウランハ酸素又ハ空気ナシデ爆発ス

四、実験ノ状(旧)況

1. ウラン化合物ノ製造研究

(以上 10 頁)

(1) 当時、フランスが研究用に所有していたウランは 300Kg の U_3O_8 で、Halban らの論文に記載されている (H. Halban, F. Joliot, L. Kowarski, and F. Perrin, *J de Phys. Rad.*, 10, 428(1939))。アメリカでは 200Kg の U_3O_8 を用いて、Anderson らが実験を実施している (H. L. Anderson, E. Fermi and L. Szilard, *Phys. Rev.*, 56, 284(1939))。仁科は、これらの文献から得た数値をもとに信氏の質

問に答えている。この時期は海外との情報交流は完全に断絶していたので、仁科はこれ以上の情報を持っていなかったと思われる。

(2) ここで、信氏は唐突に「液体酸素ヲ爆薬トシテ戦場デ使用スル」という質問をしている。なぜ、このような質問が飛び出したのであろうか。これを試みに推理してみる。信氏らが仁科研究室へ情報収集を開始する前の「東二造」での予備調査の結果である「ウラン (U) ニ就テ」(昭和 18 年 4 月)の書類(資料 1 頁註 (6))には次の文がある。

「ウラン」同位元素 U_{235} ヲ水ニ浸スコトニ依リ原子分裂ノ「エネルギー」ヲ生ズルモノ
ニテ之以外ニ反応ノ起ス方法ナキガ如シ。水ガスノ如キ状況ニテ「エネルギー」発生源
トナルハ全ク了解シエズ。

すなわち、「東二造」ではウラン核分裂連鎖反応における減速材としての水の役割をまったく理解できていなかった。そのため、その後も連鎖反応における水的作用について疑問を持ち続けていたと思われる。これが資料 4 頁の「4. U 爆薬トシテ利用スル際水ヲ必要トスル理由」という質問になり、これに対して仁科から「U ノ第二次的ニ放出セル中性子ハ水分子ニ衝突シ H ヲ遊離セシムルト共に速度ヲ小ナラシムル…」という返事が出ている。さらに、資料 5 頁の 7 項に「 U_{235} ガ水ヲ分解シ」とある。ここで、傍線は注釈者が付けたもので、これらの表現が素人に対して誤解を生じさせる原因となったのであろう。正確に説明するとすれば、「U の第二次的に放出する中性子は水分子に衝突し速度を減少させるとともに H を遊離させる…」と言い換えるべきで、また、「 U_{235} ガ水ヲ分解シ」という文言は不必要であろう。軽水減速炉では、炉心内に遊離水素が中性子減速現象に伴って発生することは現在では常識になっている。そして、その水素を触媒によって緩やかに酸素と結合させ水にする装置が必ず設置されている。傍線を付けた部分から「東二造」では原子爆弾の爆発の原理は、ウラン原子核の急速な核分裂反応で放出されたエネルギーによるのではなく、核分裂反応で発生した高速中性子が水分子に衝突して減速を受ける際に生ずる遊離水素が酸素と化学反応し、その際発生するエネルギー(いわゆる、爆鳴ガス)によると理解していたと推定すれば、この信氏の唐突な質問が理解できるであろう。

弗化カリト弗化水素ノ複塩ヨリ電解ニテ弗素ヲ得ルコトニ成功セル
モ ウランニ之ヲ作用セシメ UF_6 ヲ得ントセルモ 反{應}セズ 若干得タルモノ
ノ如クナルモ UF_6 ハ水ニテ容易ニ分解スルヲ以テ未ダ UF_6 ヲ取得スルニ至
ラズ U ノ代リニウランカーバイドヲ使用シ得ルヲ以テ別ニウランカーバ
イドノ製造研究ヲナシアリ

2. U ノ製造研究

酸化ウランヲ原料トシ 之ニ Mg-Al 等ヲ加ヘテルミット法ニテ製
造シタルモ 未ダ良品ヲ得ズ 表面ニ酸化物ヲ残シアルガ如シ
グリーンソルト $KFUF_4$ ヲ食塩塩化カルシウムト共ニ電解スル方法
ヲ研究シタルモ 目下容器ニ生成スル U 熔着シテ之{ガ}取出シニ
困難(旧)シアリ

3. ウランカーバイドノ製造(1)

酸化ウランニ炭素ヲ混{合}シタルモノヲ{真}空ノ下 電{氣}炉({攝}氏
一五〇〇度ニテ製造スル如ク)目下炉{ノ}組立ヲ終リ温度測定中ナリ
(以上 11 頁)

(1) ウランカーバイド法は、爆発事故後取り組まれたもので、この報告が行われた直前の 1944 年 1 月

に、「米粒」大の 6 フッ化ウランの精製に木越は成功している(前掲木越)。

反{應}ニ平衡アルモノ酸化炭素ヲ除去セバ反{應}ハ一方ニ進行スル
ヲ以テ CO 除去ノ{爲}{真}空下ニテ行フモノトス
電{氣爐}ノ抵抗材トシテモリブデンヲ使用シアリ
(以上 12 頁)

仁科研究室ニ於ケル U 研究状況(昭一九、一一、一七)

一、出席者

仁科博士、信氏中{將}、石田技師

二、研究進捗状況(仁科博士説明)

本年二月以来余り進捗シテキナイガ左ノ通りデアル

1. U 弗化物ノ製造

UF₆ヲ作ルノニハカーバイ{ト(ママ)}法ガ一番良イコトガ分ツタ
タンマン{爐}ニ酸化ウラント炭素ヲ入レ摂氏一六〇〇—一七〇〇度ニ加熱
スルト CO ガ一気圧以上ニナツテ出テ来ルカラ空気ガ入ル余地ガナイ
出来タカーバイ{ト(ママ)}ハ急イデ取り出シテ{真}空ノ容器ニ入レル コノ間
未ダ生成物{ハ} CO ヲ出シテ{キ}ルカラ酸化物トナル恐ハナイ之ニ F₂ヲ作
用セシメルガ F₂ハ有{毒}ナ為取扱ニ困難シタガ図ノ様ナ石英瓶
内デカーバイ{ト(ママ)}ト F₂トヲ反応セシメテ UF₆ヲ作ツタ反応ノ進行
ハ外カラヨク見エル 塩素ヲ使フノハ触媒ノ意味デアル生成シタ
(以上 13 頁)

U{F₆}ヲ捕集密封シタモノガ一度爆発シタコトガアツタガ 其ノ中ニ F₂, HF 等
ガ混{ジテキテ}温度ノ上昇ト共ニ膨張シテ爆発シタモノト認メラレル

第 2 図

2. U 弗化物ノ精製

前項ニテ出来タ UF₆ニハ F₂, HF, Si 等ガ混在シテキルノデ図ノ如キ硝子
装置ヲ用ヒポンプデ排氣シナガラ精溜ヲ繰返シ不純物ヲガス状ニテ
排出セシメ純 UF₆ノミ寒剤デ冷却シテ捕集スル如クス 蒸溜ニガラスヲ
使{フ}ガ硝子ヲ蝕ス為{壞}レ易イ
(以上 14 頁)

第 3 図

3. 軽及重U弗化物ノ分離濃縮

第4図

図ノ如キ分離塔ニ試料ヲ60°Cニ加温シテ入レタ後
内管ヲ摂氏三五〇-四〇〇度ニ熱シテ外套ヲ摂氏
五〇度ノ温水デ冷却シテ蒸溜シタルニ UF₆ ハ色々ノモノ
ヲ侵蝕シニ〇〇-三〇〇瓦仕込シテ試料ハ約一
五〇瓦食ハレテ行{エ}不明ニナツタ。銅壁ヤ氣

(以上 15 頁)

密用パッキングニ使用シタ銅粉(一部コボレテ内部ニ残存シタモノ)ニ作
用シタ{ }モノト思ハレル 硝子モ蝕カサレルノデ之モ使ヘナイ UF₆ 中ノ不純物ニ
基クモノカトモ思ハレタガ最近精製出来ルヤ{ウ}ニナツタノデ之ヲ用ヒタガ
ヤハリ食ハレル即チ圧力ハ一時間ニ水銀柱ニ一三耗位減少ス
二箇所ノバルブハ硝子モグリースモ使ヘナイノデ特別ナ型式ノ金属
ヲ用ヒテキル(1)

分離濃縮シタモノハサイクロトロンデ遅イ中性子ヲ当てテ 試験スルト{U₂₈₅(ママ)}
ノ方ハ遅イ中性子デモ放射性トナルノデ其ノ強度ヲ分離濃縮前後ノ
モノニツキ比較スレバ濃縮ノ程度ガ分ル(2) 先般コノ試験ヲ昼夜兼行
デヤツタ結果不純物ガ入ッテキタ之ハ UF₆ ヲ水ニ入レルト非常ニ発熱
スルヲ為容器トシテ用ヒタ硝子ヲ蝕シテ不純物ヲ生ズルモノト思ッテキ
ル今コノ純度ヲ測定中デアル

尚蒸氣ノ圧力ハ〇。六気圧ガ良イト言{フ}コトガ分ツタノデ コノ圧デ現在ヤ
ッテキル{UF₆}ハ(3)

(以上 16 頁)

(1) ここに記述されている分離実験は、1944年7月から始められ、翌年の初めまで続けられた(『日本科学技術体系 4』467頁)。

(2) この実験は山崎文男が担当し、1945年に最初の測定が行われたが、分離の事実は確認されなかった(『昭和史の天皇』および木越前掲記事)。この後の1945年4月に分離塔が置かれていた理化学研究所49号館は米軍の空爆で焼失し、6月に仁科は計画の中止を陸軍に申し出るようになった。

(3) 最後の分子記号は斜め線で消されている。

{UF₆} {ハ} U₂₃₅ ト U₂₃₈ {ヲ} 分離スル為ノ中間行程ノモノデ实用スルノハ濃縮シテ
U₂₃₅ ノ多クナツタ UF₆ ヲ水デ加水分解シテ UO₃ トシタモノヲ用ヒルス様ニ
シテ { } U₂₃₅ 含有率〇。七%ノモノガ約一〇% 程度ニナル
軽イ UF₆ ヲ更ニ蒸溜濃縮スル為分離塔ヲ更ニ一基建設中デアル

三、質疑応答

問 サイクロトロンヨリ強(旧)カナル中性子ヲ出ス為ニ 真空管ノ強(旧)カナモノノ
入手困難ナリトノコトデアツタガ 其ノ後ハドウカ

答 {真}空管 其ノ後大キナモノヲ入手シタガ 未ダ充分デナイ 電圧一四〇〇〇
一五〇〇〇ボルトヲ必要トスルガ之デハ壊{ハ}レルノデ 今デハ更ニ強(旧)ク
スル為{茲}デ{真}空ニシテヤッテキル(1)

問 Uハ基ニナルモノトシテ一〇Kヲ必要ト{スル}モ爆薬トスル場合ニハ{コ}ノ
一〇Kニ代ッテ一般ノ爆薬ヲ用ヒテハ駄目カ

答 夫ハ駄目ダ少量ノ U デハ連鎖反応ガ止ンデアフ即チ中性子
ハ U₂₃₅ ニ当ラケレバ他ヘ逃ゲテシマウノdeal
(以上 17 頁)

(1) 「真空管ソノ後大キナモノヲ入手シタガ未ダ十分デナイ」とあるが、ここで「大キナモノ」を入手したとされる「ソノ後」を、前回の報告が行われた 1944 年 2 月 2 日以降と考えると、矛盾が出てくる。それは前述のように、仁科の加藤安太郎への要請にもかかわらず、当時使用していた TW-530-B 以上に性能のよい機器を入手することができなかったからである(日野川静枝前掲論文)。このことから「大キナモノ」とは、TW-530-B のことと考えなければならない。この言葉は注意事項 (D) に関連していると思われる。仁科が前回の議事録に目を通してれば、この信氏中將の問に対して「ソノ後大キナモノヲ入手シタガ」とは答えなかったであろう。

その後、水素イオンによる調整は順調に推移し、1944 年 2 月 15 日にはビームの強度は 10 分の数 μA になり、間もなく $4.5\mu\text{A}$ を達成した。さらにここでいう「未ダ十分デナイ」状態の改善のため、電圧を高める調整が 6 月頃まで実施された結果、加速重水素イオン・ビームによる核物理実験をするためには内挿ターゲットによる方法しかないことが明らかになった。そして、最終的には 10MeV の $350 \sim 400\mu\text{A}$ 重水素イオン・ビームを得ることができた。こうして、1944 年 7 月 10 日に大型サイクロトロンは不十分ながら一応核物理実験ができる状態になった。

理研での実験研究は、1944 年 7 月中旬から翌年 6 月下旬まで、途中、空襲による 1945 年 4 月上旬の中断をはさみ、継続的に実施された。原子力開発に関する研究で、主な実験題目と研究者は次の通りであった(『科学研究所報告』p.169-170)。

実験題目	研究者
1. 中性子による U-235 の存在比の測定	山崎 文男
2. 熱中性子による U-235 分裂の研究	新聞 啓三
3. U によるおそい中性子の捕獲の研究	田島 英三
4. U による熱中性子の吸収の研究	杉本 朝雄

16 頁にある「分離濃縮前後ノモノニツキ比較スレバ濃縮ノ程度ガ分ル先般コノ試験ヲ昼夜兼行デヤツタ」という文章は、上記の 1 の実験題目に相当している。また、朝日新聞社の泊次郎記者が「幻の原爆開発」の記事取材のため、田島英三にインタビューをした際に、田島は実験題目 3 に関連したと思われる話をしている。その短い情報から明確に内容を知ることが不可能であるが、理研では非均質系での連鎖反応の可能性をも考えていたように推定される(1995 年 11 月 27 日付け泊次郎から深井佑造への手紙。関係する部分は「田島さんたちは、1944 年頃、ウラン 238 による共鳴吸収効果を調べるため、直径 30 センチ高さ 40 センチほどの円筒状にした酸化ウラン(ところどころに 2 酸化マンガンを入れた穴を開け)にサイクロトロンから出る中性子をあて、実験したことがある。論文にはなっていない」である。素直に読めば、ウラン 238 の共鳴吸収効果を測定したように見えるが、酸化ウラン棒内の Mn の被放射能の分布から、共鳴吸収効果は測定できない。実験題目 3 に関連して考えると、終戦前の原子核分野の研究者は現在と異なり、E. Fermi を含めて、天然ウランの遅い中性子の捕獲反応はウラン 238 の共鳴吸収と関連していると考えていた(詳細は『技術文化論叢』no.2 の深井論文参照)から、この田島の実験の目的は熱中性子の天然ウラン棒内の中性子束分布の測定と現在では考えられる。従来から理研での開発目標の原子炉は均質型であるから、非均質系の連鎖反応を開発目標と設定しない限り、この手紙に記された田島の実験は不必要と思われる。ただし、これは開発目的には無関係のたんなる基礎研究とも考えられる(別の記述では、田島の研究テーマは「非均

質系における U による遅い中性子捕獲の研究」となっている。田島英三「理研のサイクロトロン物語」『日本物理学会誌』Vol. 45, no. 10, 1990 年 736 頁。ちなみに田島はのちに、「私のテーマは、ウランを大量に使用して非均質系をつくり、中性子がウラン・二三八に捕獲されない確率を測定するもので、原爆ではなく核エネルギーの開発に関係したテーマである」と述べている。田島英三『ある原子物理学者の生涯』新人物往来社 1995 年 72 頁)。

一〇Kアッテ始メテ 中性子ガ外へ逃ゲズニ内部デ次カラ次へ連鎖式ニ作
用シテ行クノデアル

中性子ハ U_{238} ニモ喰ハ{レ}ル又Uニ水ヲ加ヘルカラ中性子ハ水ニモ食ハレル 此
等ノ割合ヲ測定スル必要ガアル

尚 U_{235} ヲ一〇{ %含有シテキルモノガ一〇K位必要デアルコトハ計算カラ }
出タノデアッテ計算{ノ}中ニハ常数ヲ考慮ニ入レテアル(1)

而シテコノ計算ガ妥当ナリヤ否ヤヲサイクロトロンヲ使ッテ測定シテキル
測定ノ結果一〇Kデ足リルカ 或ハ二〇K、五〇Kモ要スルカモ知レン U_{235} 含

有率〇・七%ト一〇%トノ間ニハコノ数量ニ余リ変リハ
第 5 図 ナイガ 含有率が五〇%以上トモナレバ大分変ッテ来ル
カモ知レン 然シ五〇%ニスルコトハ相当困難デアルシ 一〇〇%
ニスルコトハ不可能ダラウ(2)

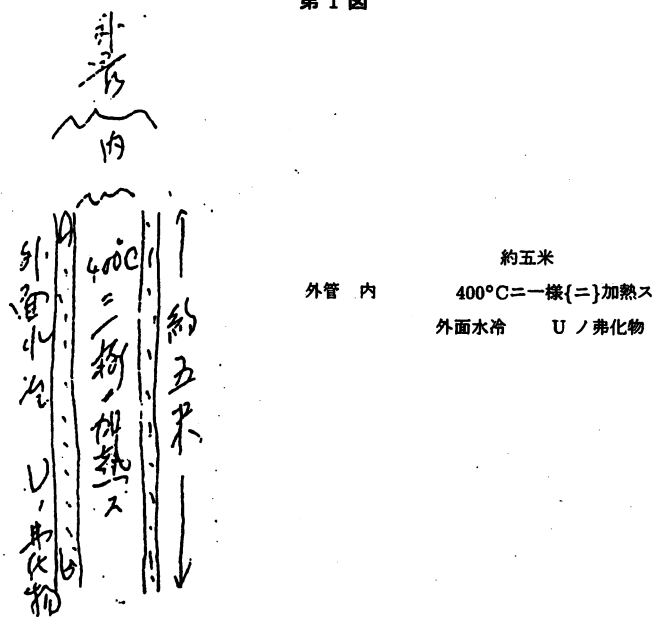
U ガ爆薬トナルカドウカハ 反応速度ヲ調ベナケレバ分{ }ラナイ
速度ガ速イ為実測{ハ}出来ンカラ計算デアル外仕方ガナイ

(以上 18 頁：資料終)

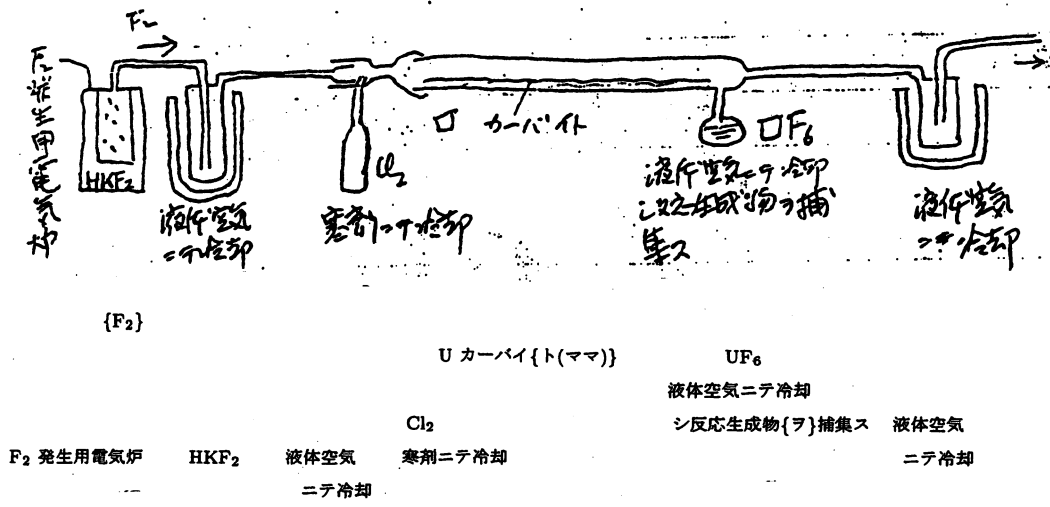
(1)ここには、臨界量はウラン 235 を 10% まで濃縮したウラン 10Kg ほどで、これを水と混合すると書かれている。これは竹内柁の実験ノートに「5 ~ 10% に濃縮し、その 30 ~ 10Kg を 50 ~ 30 リットルの水に混合する」と書かれている内容に対応する(『日本科学技術史体系』446 頁)。

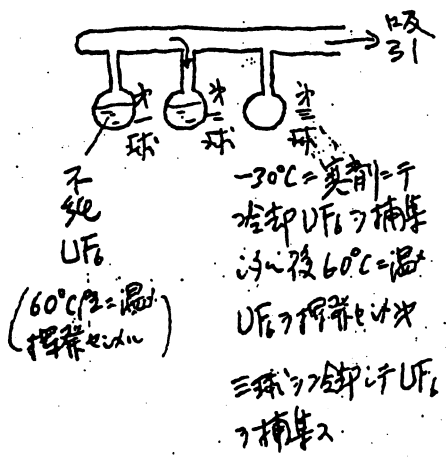
(2)「コノ数量」を臨界量として考える。竹内柁の戦中に高速中性子の連鎖反応による天然ウランの臨界量を計算したメモに準拠して、ウラン 235 含有率の問題に拡張してみる(前出、4 頁註(1))。得られた結果によると、臨界量はウラン 235 含有率の 3/2 乗に逆比例する。即ち、0.7% のウラン 235 含有率を 10% にすると臨界量は 1/54 に低下するが、10% のウラン 235 含有率を 50% にしても臨界量は 1/4.8 しか低下しない。この結果は「反応度」への寄与の割合として検討した場合と同様で、仁科が言っている「 U_{235} 含有率〇・七%ト一〇%トノ間ニハコノ数量ニ余リ変リハナイガ含有率が五〇% 以上トモナレバ大分変ッテ来ルカモ知レン」は誤りである。正確には、次のような逆の情報を与える文になるべきである。「 U_{235} 含有率〇・七%と一〇%との間では、この数量は大分変わってくるが、含有率が五〇% 以上となってもあまり変わりはない」。しかし、ウラン 235 の核分裂断面積の測定結果が得られていない当時の状況では、ウランを濃縮して核燃料のウラン 235 含有率を増加させて連鎖反応実現への効果を正確に予測することは困難であったと考えられる。この時期には、一般に核分裂断面積は 280 ~ 430b と考えられていたが、玉木英彦は計算によって核分裂断面積を 500 ~ 1000b という高い値を予測していた(前掲、皆川、玉木)。この値は「二号研究」でウラン濃縮法開発に高い優先度を与えていた仁科にとっては望ましいことであつたに違いない。このように考えると、この点の誤りは冒頭の注意事項 (A) には属するが、むしろ仁科の願望であつたと言ふべきであろう。

第 1 図



第 2 図

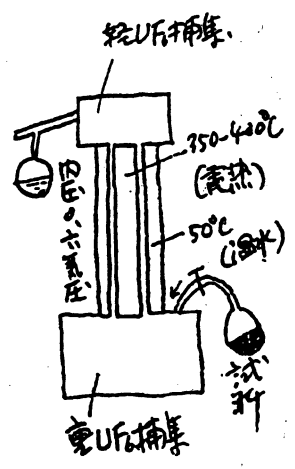




第3図

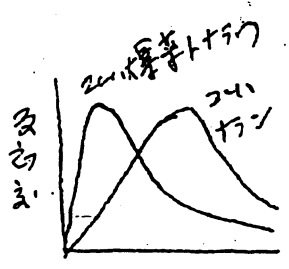
{吸引}

<p>第一球</p> <p>不純UF₆</p> <p>(60°C位=温メ揮発セシメル)</p>	<p>第二球</p> <p>-30°C {ニ} 寒剤ニテ冷却UF₆ヲ捕集シタル後60°Cニ温メUF₆ヲ揮発セシメル</p>	<p>第三球</p> <p>三球ヲ冷却シテUF₆ヲ捕集ス{ }</p>
--	---	--



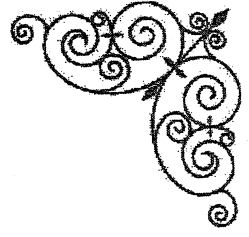
第4図

<p>軽UF₆捕集</p> <p>350 - 400°C (電熱)</p> <p>50°C (温水)</p> <p>試料</p>	<p>内圧〇. 六気圧</p>
---	-----------------



第5図

コレハ爆薬トナラウ	
反応度	コレハナラン



博士論文梗概

鉄滓分析によるわが国前近代製鉄技術の研究

高塚 秀治

第1章. 研究の課題と方法

1. はじめに

鉄の生産については、いつ、どこで、いかなる形態で始められたかについては未だ確言できない。ただ、今までに発見された製鉄炉の遺構とそれに随伴する遺物、あるいは古墳から出土した鉄滓や鉄器などの試料の分析によって、わが国の製鉄の起源は今のところ、6世紀代までに遡られている。今後、こうした考古試料の新たな発見と、これに対する自然科学的解析を通じて、わが国における製鉄の起源は6世紀代よりさらに遡る可能性は大きい。

一般に、鉄の製造技術の発展を明らかにしようとするれば、一方には、いかなる社会制度的な枠組みで鉄の製造が展開してきたか、あるいは鉄製造技術の発達が文化的・経済的あるいは政治的問題とどのような関係にあったかなど、社会との関わりで鉄の歴史を明らかにする課題があり、他方では、製鉄技術そのものの発展過程を解明する課題がある。これらの研究は従来人文的手法、あるいは考古学的手法、そして自然科学的手法によって取り組まれてきたが、特に自然科学的手法による課題は今なお多く残されている。

こうした点をふまえ、本研究は主として自然科学的手法を用いることにより、問題の解明を試みたものである。

2. 研究課題

従来の自然科学的手法による遺跡試料の分析データは、遺跡試料の発掘そのものからして必ずしも体系的に行われているわけではなく、分散的個別的であり、したがって、製鉄技術の発展に対しても部分的な説明にとどまっている。すなわち、部分史的にみれば多くの成果があげられてはいるにもかかわらず、通史的にみれば未整理の状態にあって、統一的な歴史像を与えるに至っていない。それには、これらのデータをまとめる基本的視点が必要であろう。この視点を確立するためにはいくつかの方法があると思われるが、前近代製鉄のプロセス論を構築し、つぎに、プロセス論に基づく遺跡データの整理も重要な方法の一つである。

したがって、本研究は、自然科学的な方法によって製鉄プロセスを解明し、製鉄関連遺物の分析データを整理し、わが国前近代製鉄技術を解明することを課題とする。

3. 研究方法

前記課題を解明するための作業の全体的なフレームとしては、前近代製鉄プロセス理論を作るために、還元反応プロセスと遺跡試料の分析によって前近代製鉄の状態を明らかにする。そして、近現代において確立された還元プロセス理論を補足するために、熱分析法を用い1000～1300℃までの岩鉄と砂鉄による直接還元反応の進行状態を明らかにする。さらに、これらの研究結果を遺跡試料の分析に適用する。

上記のプロセス論にもとづいて、分散状態にある各地の既存の製鉄遺跡データや、新たに本研究に関連して発掘された製鉄遺跡の解析データを整理しつつ、製鉄プロセスの視点から時代的には古代と近世の製鉄技術について、また、地域的には製鉄原料の質についての比較検討を行ない、製鉄技術の歴史的発展を解明する。

第2章. 前近代製鉄における還元・酸化反応の解析

本章では、前近代の製鉄炉内で展開される製・精錬反応プロセスについて解明するために、前近代製鉄で用いられたと考えられる岩鉄や砂鉄を試料として、熱分析法による還元反応実験を行い、還元プロセスを解析する。そして、得られたデータに基づいて製錬プロセス、および精錬プロセスを推論する。

1. 熱分析法による還元反応の研究

高温下の炉内で起こる還元反応の状態、あるいはそれによって生じる結晶鉱物などの生成物を明らかにするため、岩鉄と砂鉄、あるいは組成の異なる異種の砂鉄について、熱分析法による還元反応実験を行った。

1. 1 実験方法

熱分析実験では、以下のような試料を用いた。なお、かっこ内の数値は、一回の実験で使用した試料量である。

- ① 鉱石原料として砂鉄、または磁鉄鉱 (25mg) で、粒径は53~100 μ mのもの。
- ② 活性炭 (15mg)。
- ③ 陶器粘土 (5mg)。

実験は1000℃から100℃毎に1300℃までとし、試料は最終温度に到達後20分間最終温度を保持した。実験終了後試料試料を室温まで自然冷却した。また、室温から1300℃までの熱分析実験結果については図1と2の通りであった。なお、図中のTGAは試料の熱重量分析結果を、DrTGAはTGAの微分値を、DTAは示差熱分析結果を、さらに、Tempは温度変化を意味している。

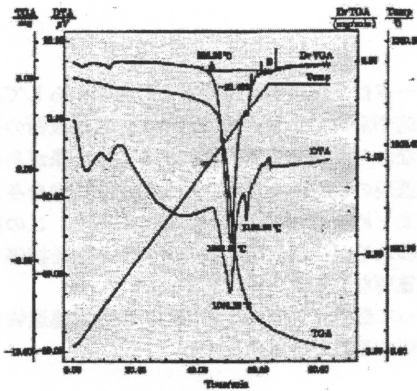


図1. 岩鉄 (53~100 μ m) の活性炭による熱分析結果. 图中的898.03は還元反応 $FeO + CO = Fe + CO_2$ の開始温度. 1049.23℃は吸熱温度のピークを示し、-10.469は試料の減量値

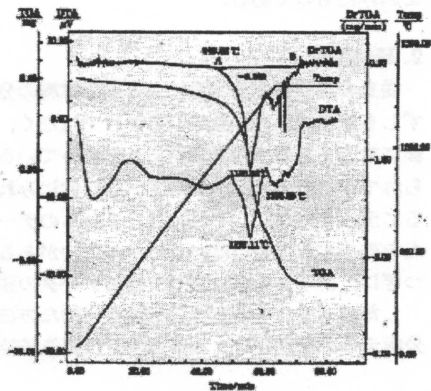


図2. 砂鉄 (53~100 μ m) の活性炭による熱分析結果. 图中的949.83は還元反応 $FeO + CO = Fe + CO_2$ の開始温度. 1137.11℃は吸熱温度のピークを示し、-8.033は試料の減量値

1. 2 実験結果

1. 2. 1 岩鉄の場合

図1では、まず、800℃付近でゆるやかにTGAの下降(重量減少)、DTAの上昇(発熱反応)が認められる。TGAの下降は、活性炭とこれに吸着していた酸素とによる反応によるCOの生成、これを引き金としてガス還元反応が起こり、FeOが生成することによって起こる。次いで900℃付近から急速にDTAとTGAが下降する。この温度以上から、ブドール反応によるCOの再生という機構、すなわちみかけ(あるいは真)の直接還元として進むと思われるが、 $FeO + C \rightarrow Fe + CO$ の反応が十分早く進むのには900℃程度の高温を必要とすることが分かる。各温度域における生成物質については、走査型電子顕微鏡で観察を行ったが、その結果は写真1ようであった。

<1000℃>まで昇温した場合

写真aでいちばん輝度の高い部分は酸化鉄が還元されてできた還元鉄部分である。また、この温度帯では他の生成物はほとんど認められなかった。

<1100℃>まで昇温した場合

写真bのように金属鉄の他に微細で針状の結晶鉱物も観察できた。この結晶鉱物はファイヤライト(理論的には Fe_2SiO_4)と推定できる。

<1200℃>まで昇温した場合

写真cのように、ファイヤライトの面積率が增加する。そして、そのわずかの隙間に非晶質の存在が認められた。

<1300℃>まで昇温した場合

写真dのように、この温度域ではファイヤライトは晶出していなかった。

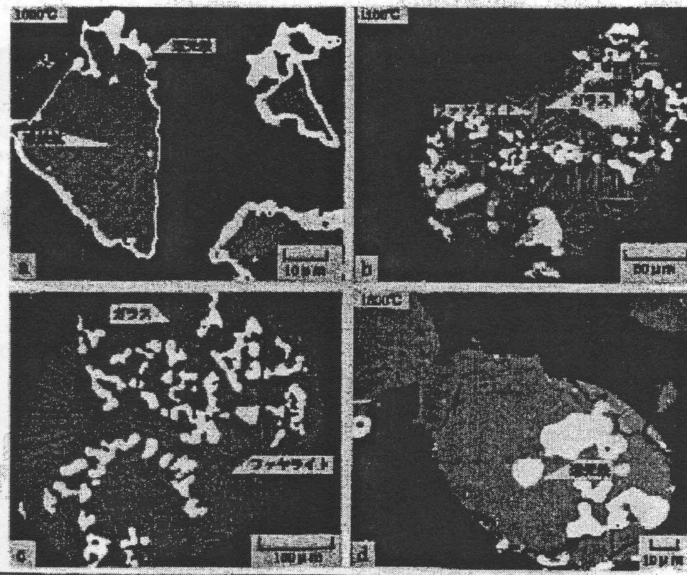


写真1. 岩鉄の活性度による反応で生成/晶出する結晶体物相

1. 2. 2 砂鉄の場合

砂鉄についても岩鉄と同様の実験に、設定温度範囲は室温から1300℃までとした。

図2から、850℃付近からゆるやかにTGA曲線の下降、DTAの上昇が認められるが、これは岩鉄の場合と同様の理由による。つぎに、DrTGA、DTA曲線で950℃付近から急激な重量減少と吸熱反応が進行し、その反応量は1130~1140℃付近の温度帯で最大となる。砂鉄の還元進行は、岩鉄の場合とほぼ同様であるが、岩鉄に比べて急激な反応の開始温度で約50℃、反応最大量で約90%高い。これは、後者には約6wt%のTiO₂が含有していることに起因する。岩鉄の場合と同様に各温度域における生成物質の電子顕微鏡による観察を行ったが、その結果は写真2ようであった。

<1000℃>まで昇温した場合

写真eでは、砂鉄粒子に網目模様が見れ、砂鉄中の旧イルメナイト界面に沿って還元が進行した様子が認められた。

<1100℃>付近まで昇温した場合

写真fでは、金属鉄の他にウルボスピネルとファヤライトが観察できた。

<1200℃>まで昇温した場合

写真gでは、ファヤライト、ウルボスピネルが認められた。また、他の電子顕微鏡視野ではイルメナイト近似の結晶鉱物の生成が認められた。これは、一部のウルボスピネルが還元されイルメナイトに相転移したものと見られる。

<1300℃>まで昇温した場合

写真hでは、非晶質（非晶質）中にルチルと判定できる結晶鉱物が見いだされた。ただし、

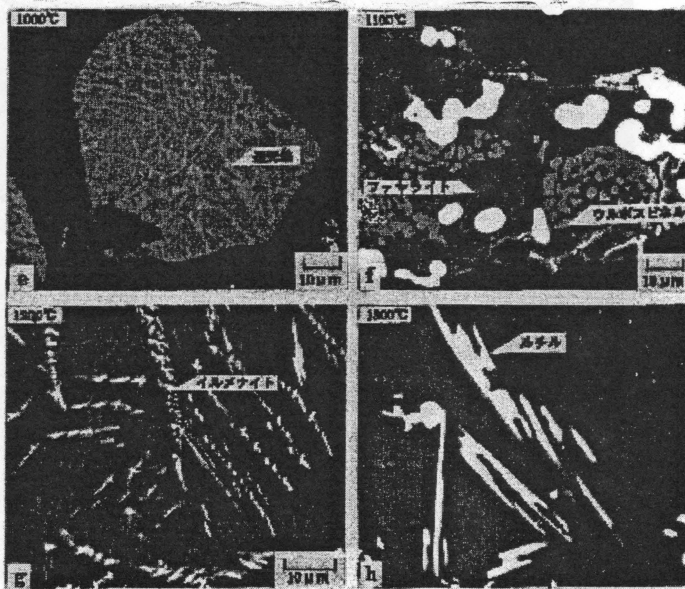


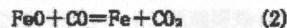
写真2 砂鉄の活性炭による反応で生成/晶出する結晶鉱物相

写真中には存在しないが、ルチルの前段階生成物であるフェロシュードブルカイト（理論的には FeTi_2O_6 ）は $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ の温度域で生成するものと思われる。また、この温度領域では岩鉄の場合と同様にファヤライトは晶出していなかった。

以上から、わが国前近代の製鉄温度を鉄滓から類推するためには、ファヤライト、あるいは FeO-TiO_2 鉱物が重要な指標鉱物と見てよい。また、砂鉄の還元プロセスでは、砂鉄中の TiO_2 はほぼ全量が鉄滓に移行するので、 TiO_2 の挙動から前近代製鉄炉の還元度を知るための成分であることがわかる。

2. 前近代における製鉄プロセス

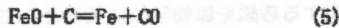
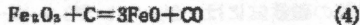
熱分析の実験結果から、前近代炉内での製鉄プロセスは、次のようなものであったと考えられる。すなわち、岩鉄、砂鉄を問わず鉱石から金属鉄を取り出すためには酸化鉄を還元するだけでなく、脈石を分離・除去しなければならない。したがって、前近代製鉄における技術上の主要な問題は、酸化鉄の還元と脈石分離除去の2つがある。まず、酸化鉄の還元プロセスについて見ると、低温域では上昇ガス中の CO によって次のように行われる。



反応(1)、(2)は、いずれも可逆反応で、反応を右向きに進行させるためには CO 分圧を平衡値より大きく保たねばならないが、ガス量に比べて鉱石量が非常に小さい前近代炉では、この条件は、少なくとも平均的には容易に満たされると思われる。一方、これらの反応が高温域（例えば $900\sim 950^\circ\text{C}$ 以上）で進む場合は、次の可逆反応が同時に進行する。



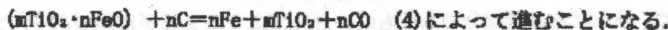
したがって、総括反応は、(1)+(3)、(2)+(3)から



以上が製鉄プロセスのもっとも基本的なものであるが、砂鉄の製鉄プロセスについては次のように行なわれると考えられる。すなわち



(1)+(2)により



以上が前近代炉内における製鉄プロセスである。

また、脈石の除去については、製鉄によって熔融鉄滓（ノロ）を生じさせ、金属鉄に付着する脈石等が分離除去される。

さらに、精錬プロセスは、強熱された酸化炭により鉄は酸化脱炭される。したがって、精錬は酸化プロセスということになる。したがって精錬プロセスの一般式は



酸化炭とは燃焼木炭と酸素との反応において発生した二酸化炭素と自由酸素からなり、この自由酸素により滴下する鉄が酸化され脱炭すると考えられる。したがって、この場合には



第3章. 製鉄遺跡試料の解析

第1章では、還元と酸化についてのプロセスの構築を試みたが、そのプロセス論の有効性を検証するために、本章では、製鉄関連資料の組成分析データの解析を通し、前近代製鉄の酸化・還元反応の検討を行う。

1. 化学組成分析

研究対象とした製鉄関連遺跡は、岩鉄製鉄遺跡として滋賀県の古橋、北マキノ遺跡など15と広島県のカナクロ谷遺跡で、16遺跡、また砂鉄製鉄遺跡では尾崎前山、ゴマンクボなどの9遺跡、鍛冶(精錬)遺跡として鳩山など3遺跡の総計31遺跡である。

製鉄滓の分析結果から、岩鉄製鉄が行われていた滋賀県湖南地方においてリン(P_2O_5)とカルシウムが、広島県カナクロ谷遺跡ではマンガン(MnO)が多く含まれているという特徴を示していた。

また、砂鉄製鉄遺跡から出土した鉄滓については、いずれの製鉄滓にも数パーセントから十数パーセントの TiO_2 成分を含んでいた。これは砂鉄製鉄滓のもっとも大きな特徴である。

さらに、鍛冶(精錬)遺跡における鉄滓分析結果を見ると、鉄成分を多く含む鉄滓が多く、中には TiO_2 成分を数%含む鉄滓もある。

2. 鉱物組成分析

岩鉄と砂鉄の鉱物組成分析の結果についてみると、滋賀県下の遺跡で採取した岩鉄(磁鉄鉱)の鉱物組成は、湖南地域の特徴として、磁鉄鉱に脈石として含水リン酸カルシウム($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)と角閃石。また、カナクロ谷遺跡の磁鉄鉱には、鉄-マンガン-ガーネットと角閃石を含むものがあつた。また、わが国に産する砂鉄を鉱物学的に見ると、主としてウルボスピネル-マグネタイト固溶体、イルミナイト-ヘマタイト固溶体、あるいは両固溶体の離溶共生(構造)として存在する。

つぎに、鉄滓の鉱物組成について述べる。岩鉄製鉄滓は

1. 結晶鉱物としてはファヤライトのみで、残部はわずかな非晶質部からなるもの。
2. 結晶鉱物はファヤライト、鉄酸化物鉱物(ウスタイトまたはマグネタイト)で、残部は非晶質部分であるもの。
3. 結晶鉱物はファヤライトと僅かに鉄酸化物鉱物(ウスタイトまたはマグネタイト)を含むもので、残部は非晶質部分であるもの。というように分類が可能であり、また、砂鉄製鉄鉄滓は

1. 酸化鉄、 FeO-TiO_2 鉱物、およびファヤライトからなり、残部は非晶質部からなるもの。
2. FeO-TiO_2 鉱物とファヤライトからなり、残部は非晶質部からなるもの。というように分類できる。

さらに、鍛冶(精錬)滓の特徴は、ウスタイト、ファイアライト、非晶質からなるが、砂鉄製鉄起源の場合には、それらに加えて FeO-TiO_2 鉱物、が含まれることが多い。

3. 製鉄プロセス論と遺跡試料分析結果の関連

本章では、上記の遺跡試料の分析結果を第2章で提示した製鉄プロセス論との関連を検討する。

3. 1 製鉄プロセスから見た鉄滓の検討

製鉄プロセスについては、特に砂鉄製錬のプロセスについてみてみる。砂鉄中のTiO₂は前近代炉ではそのほぼ全量が鉄滓に移行するとみられるので、砂鉄から金属鉄が生成するためには、常に

$$\text{Ti/Fe(SG, 鉄滓)} > \text{Ti/Fe(IS, 砂鉄)} \quad (1)$$

という条件が満たされていなければならない。そして上式(1)の左辺の値が大きいほど、砂鉄からの金属鉄生成量は大きい。

また、精錬プロセスでは、製鉄プロセスで得られた鉄の脱炭、銅や鉄の介在物の除去が行われる。介在物の主要成分はFeO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂の4成分である。ここで、介在物除去のプロセスについて考えてみる。鍛冶滓の成分のうちFeOを除き、TiO₂ / (SiO₂ + Al₂O₃) 値 = a (以下 a) とする。このプロセスにおいて、SiO₂-Al₂O₃系鉱物を含む造滓剤が加わった場合、製鉄滓 (a) と鍛冶滓 (a₁) の関係は、

$$a_2 > a_1 \quad (2) \text{となる。}$$

そして製鉄プロセスで使用された砂鉄の組成がわかれば、砂鉄と鍛冶滓のTi/Feは $\text{Ti/Fe(SG)} < \text{Ti/Fe(IS)}$ (3) という製鉄プロセスのときとは逆の関係が成立した。

3. 2 還元指数の提起

ここで、製鉄によってどれだけ金属鉄を生成する技術があったかを、遺跡試料の分析値をもとに検討を行う。砂鉄製錬の場合は、遺跡で採取した砂鉄と鉄滓の分析値から、砂鉄の全鉄量 (Total Fe wt%) を求め、この値をtとし、さらに砂鉄と鉄滓両者の組成から (Ti/Fe) が与えられれば、このときの金属鉄の生成量 (r) は

$r = t \times \{ 1 - (\text{Ti/Fe(IS)} / \text{Ti/Fe(SG)}) \}$ という式で求めることができる。r 値は砂鉄製錬を解析するために有効であり、r を「還元指数」として把握することをここに提起する。

3. 3 製鉄プロセスと製鉄温度

ここでは、先の熱分析の結果と製鉄滓の鉱物組成を比較し、製鉄温度の推定を行う。

3. 3. 1 岩鉄製錬

岩鉄製鉄滓の代表的な鉱物組成について見ると、写真1と2のようである。岩鉄製鉄滓では後山睦倉遺跡 (a) と木瓜原遺跡 (b) の試料、砂鉄製鉄滓では、富士見台 (c)、カナクソ山 (e と f)、ゴマンクボ遺跡 (g と h) の鉄滓試料があげられる。

<写真a>の試料は、ウスタイト、およびファイアライト、そしてガラスからなる。ウスタイトの生成とファイアライトの面積率から、この試料はおよそ1000℃～1100℃付近にあったと見られる。

<写真b>の試料は、ファイアライトとガラスからなる。ファイアライトの面積率から、この試料は1200℃付近に達していたと見られる。

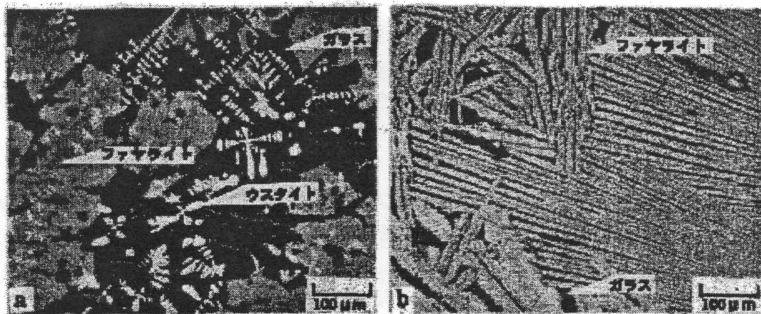


写真3. 岩鉄製錬滓に含まれる結晶鉱物

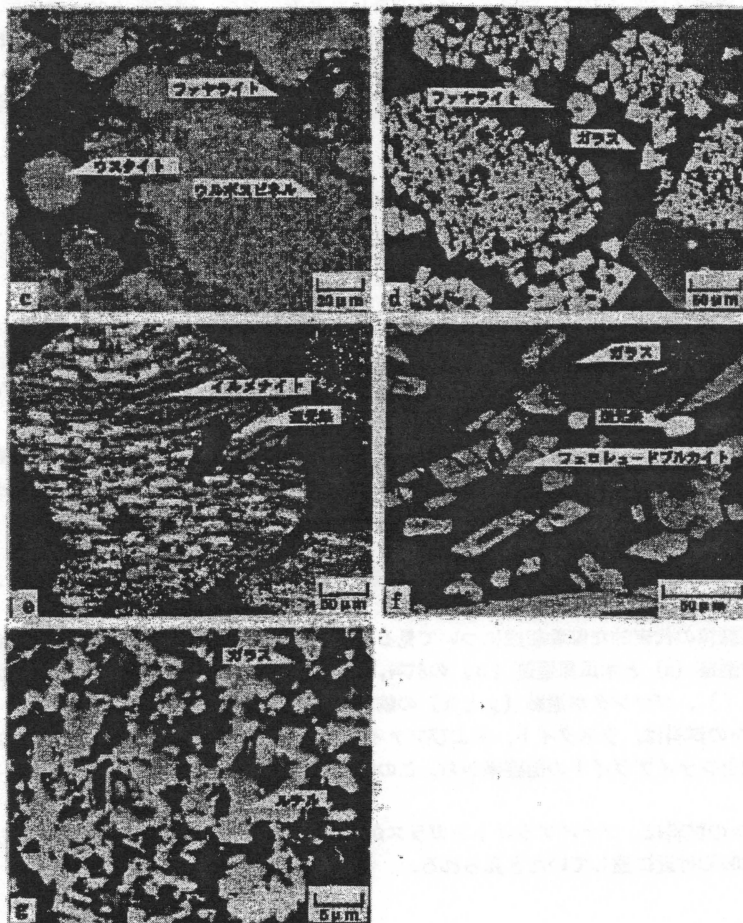


写真4. 砂鉄製錬滓に含まれる結晶鉱物

<写真c>の試料は、FeO-TiO₂鉱物、ウスタイト、およびファイアライトからなる。この試料は1100~1200℃付近にあったものと見られる。

<写真d>の試料は、FeO-TiO₂鉱物、ファイアライトからなる。この試料は1100~1200℃付近にあったものと見られる。

<写真e>の試料は、イルミナイトと金属鉄からなる。この試料は1200℃以上にあったものと見られる。

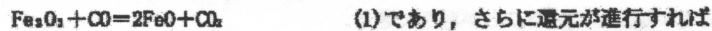
<写真f>の試料は、フェロシュードブルカイト、ファイアライト、ガラスからなる。この試料は1300℃付近にあったものと見られる。

<写真g>の試料は、ルチルとガラスからなる。この試料は1300℃以上に達したと見られる。

以上が熱分析の結果と遺跡試料の比較によって得られた遺跡の推定温度であるが、遺跡出土製錬滓には、そのほとんどに上記結晶鉱物が含まれているので、一般的に製錬滓から製錬温度を推定することが可能である。

3. 4 製錬プロセス論の検討

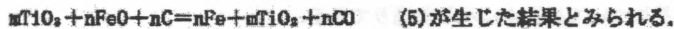
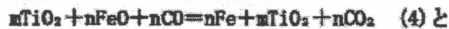
本節では、第2章で述べた、製鉄プロセスを論の有効性について検討を行う。岩鉄製錬では、ウスタイトが検出された。ウスタイトは、酸化鉄鉱物が還元されることによって生成するのであるから、以下の反応式によっていたとみられる。すなわち、



ファイアライトは、ノロの中に存在するFeOとSiO₂が冷却過程で反応し、晶出すると見られるので、この反応式は、



また、砂鉄製錬遺跡の鉄滓には、FeO-TiO₂鉱物が含まれていた。したがって、砂鉄製錬における反応式は、上記の式(1)、(2)、(3)に加え、



以上から、第2章で述べた製鉄プロセス論は一定程度の有効性を示すといえる。

第4章. 製鉄プロセス論から見た前近代製鉄技術史

本章では、前近代製錬遺跡を技術史的に把握するため、遺物の鉱物組成から製錬温度を、砂鉄製錬遺跡では還元指数によって金属鉄の生成量を求めた。そして、この結果を基にしてわが国前近代製鉄技術を時代別の整理を行なう。

1. 鉱物組成から見た製鉄技術

鉄滓の鉱物組成分析の結果を示すと表1の通りであった。表1から、岩鉄製錬滓は、いずれの遺跡出土滓にもファイアライトのみか、ファイアライトとウスタイトを含む鉄滓が存在しており、これは岩鉄製錬の一つの典型となっている。分析を行った岩鉄製錬遺跡は、いずれも6~8世紀にかけて操業されたと見られているもので、鉄滓試料には基本的な差異は認められない。いずれの遺跡試料にもウスタイトが認められることから、低温領域の克服は不十分であったと考えられる。

一方、砂鉄製錬鉄滓の鉱物組成を時代別に見ると、古代では粟田がなくそ山、月山遺跡を除

いてウスタイトが存在しており、時代が下るにしたがいFeO-TiO₂鉱物は、よりチタン濃度の高い結晶鉱物が現れるという傾向が認められる。例えば、栗田かなくそ山ではFeO-TiO₂鉱物としてウルボスピネルが認められるが、中世のゴマクボではウルボスピネル、イルミナイト、フェロシュードブルカイトなどが検出され、近世の保光たたらからはウルボスピネル、イルミナイト、小半弓からはウルボスピネル、イルミナイト、フェロシュードブルカイトが検出された。

このことから、砂鉄製錬においては古代から近世へとかけ、より高温を得る技術の獲得がなされたことが確認できる。

2. 還元指数から見た製錬技術

鉄滓の化学分析から、おのおのの遺跡の還元指数（ r 値）を求めると図3の通りであった。その平均値は、古代に属する向田遺跡(13)、安行猿貝北遺跡(6)、大山遺跡(23)、嵯忍沢遺跡(17)、高保木遺跡(12)であり、近世に属する保光たたら遺跡(44)、小半弓遺跡(43)、泉原遺跡(49)であった。図8から、前近代砂鉄製錬を次のように説明することができる。1には、古代から近世にかけて金属鉄の生成量が増加しているが、これは、還元反応部分の温度をより高温にすることが可能となり、還元反応を進行させることができたといえる。2には、 r 値のばらつきが古代から時代が下るにしたがい小さくなるが、これは、炉内の低温領域を小さくし、炉内温度のより均質化が実現したことを意味している。こうしてこの図から製錬技術が時代とともに進歩していることが理解できる。

3. 製錬温度と製錬技術

本節では、特に砂鉄製錬における還元指数と製錬温度の関係について検討する。

製錬滓に含まれる結晶鉱物の組成から、製錬温度の推定が可能であり、また、還元指数を用いて金属鉄の生成量を求めることができた。このように、遺跡試料の化学・鉱物組成分析結果から、製錬温度や還元指数を導くことにより、わが国前近代における鉄製錬の技術史的な整理が可能となる。

この結果については図4に示した通りである。

	結晶鉱物	ウスタイト	ファイヤライト	ウルボスピネル	イルメナイト	フェロシュード ブルカイト	ルチル
	晶出/生成する 温度域(℃)	900 ~ 1000 付近	1100 ~ 1200 付近	1100 ~ 1200 付近	1200 付近	1200 < .	1300 付近
岩鉄製錬遺跡	古橋 6~7c	●	●	—	—	—	—
	金ケ口谷 6~7c	●	●	—	—	—	—
	南郷城跡 7c	●	●	—	—	—	—
	源内峠 7c	●	●	—	—	—	—
	木瓜原 8c	●	●	—	—	—	—
	野路小野山 8c	●	●	—	—	—	—
	北マキノ 8c	●	●	—	—	—	—
砂鉄製錬遺跡	栗田砂塚山 古代	—	●	●	●	—	—
	尾崎前山 9c	●	●	●	—	—	—
	月山 9~10c	—	●	●	●	—	—
	安行猿貝北 10c	●	●	●	—	—	—
	堪忍沢 11c	●	●	●	●	—	—
	高保木 古代	●	●	●	—	—	—
	ゴマンクボ 中世	—	●	●	●	●	●
	小半号 18c	—	●	●	●	●	—
保光たたら 18c	—	●	●	●	●	—	

※ ●は検出される —は検出されない

表1. 製錬遺跡出土鉄滓中の結晶鉱物と製錬温度域との関係

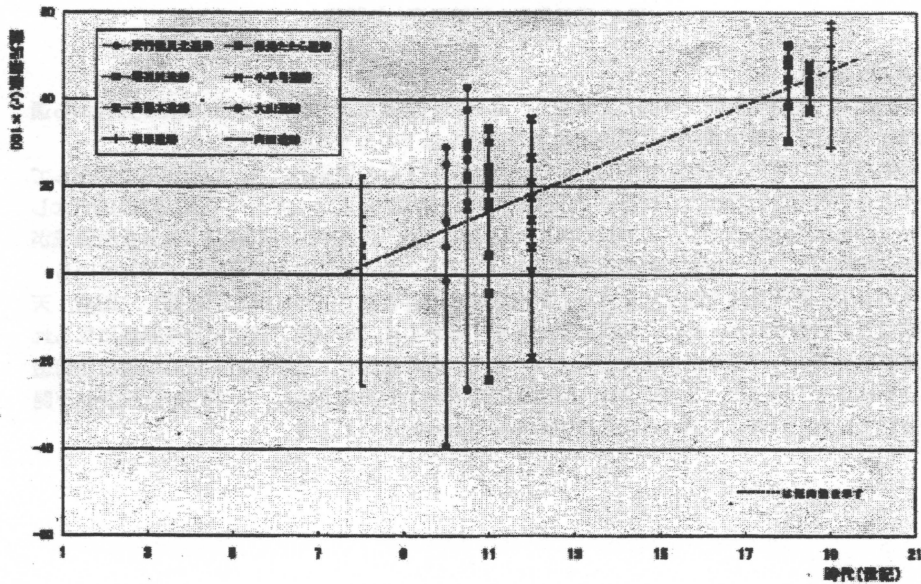


図3. 時代別に見た砂鉄製錬遺跡の還元指数

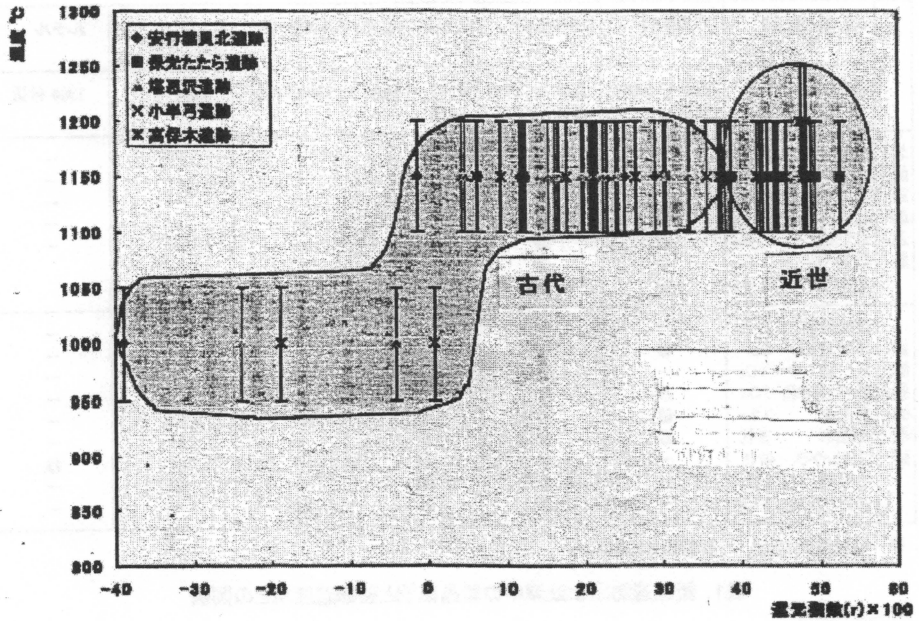


図4. 還元指数と製錬温度との関係

第5章. 結論

本研究は、前近代製鉄プロセスを解明し、さらに、製錬温度と鉄滓の鉱物組成の分析から還元指数を提起し、わが国前近代製鉄の発展の道筋を以下のように明らかにした。

岩鉄製錬はいずれも古代に属するものであるが、いずれの製錬炉にも、低温領域が存在していたことが明らかとなった。また、砂鉄製錬では、古代から近世に向かって還元指数が増大していく傾向が認められたが、これは古代から近世にかけて、製錬炉内の温度の上昇と低温領域が徐々に解消され、より均質な高温領域が得られるようになったことを分析結果が示している。したがって、製錬技術を通史的に見ると炉内温度を上昇させるために吹皮（差轆）、廻轆、天秤轆などが発明された。また、低温領域を克服するために、炉の地下構造を初期製錬に見られる簡陋な構造から、近世永代たたらのような地下水分の遮断と、放熱を防ぐための複雑な構造へと発展させていった。このように、炉内温度の上昇とその均質化は、わが国前近代製錬が開始されて以来、一貫して追求された技術的課題であったといえよう。

近代中国における物理学者集団の形成

93D20125 楊 鑑 指導教官 山崎正勝・梶 雅範

序 章 問題設定

近代中国における西洋物理学の移植は、20世紀のはじめに本格化した。その中心的な役割を果たしたのは、本研究で明らかにしたように、海外の留学先から帰国した中国人物理学者であった。確かに20世紀以前にも西洋物理学の知識は、宣教師と当時先進の中国知識人によって様々な形で紹介されてはいたが、単に知識の面だけでなく、物理学が一つの近代的な学問として、その教育、研究および応用に関わる制度的な側面も含めて、全面的に中国に移植されたのは、専門的な職業をもつ物理学者たちが新しい知識人集団として中国社会に現れた以後のことであった。

近代中国において物理学者は、どのような社会背景の中で生まれたか、彼らが一つの集団としてどのような特徴を持っていたか。また何か彼らの活動を支え、そしてその活動の内容および結果には、如何に中国社会の特質が反映されていたか。これらの四題の解明は、中国の近代物理学史研究における興味深い課題である上、中国の近代化過程に関する歴史研究の基礎作業の一つにもなると思われる。

中国の初期の物理学者がもつ集団的な特徴については、本研究では、まず1932年に創設された中国物理学会の初期会員を中心に彼らの履歴を調査、整理した。それによって次のことが明らかになった。すなわち彼らのほとんどは、留学の経歴を持ち、1918年以前に留学した人々は、外国で専門的な教育を受けたのに対し、1919年以後に留学した人々のほとんどは、国内の大学で物理学の専門教育を受けた後、さらに海外へ留学した。本研究では、この二つのグループを、それぞれ第1世代と第2世代と呼ぶことにして、この二つの世代の物理学者の誕生および彼らによって行われた教育と研究活動を中心に検討してきた。

第1章 物理学者の誕生とその社会的背景

近代中国社会における第1世代の物理学者は、上に指摘したように、ほとんど外国で専門的な教育を受けた。従って彼らの出現については、ここで彼らが物理学者となる契機になった留学の問題から説明できる。

近代中国の海外留学運動は1872年に始まったが、それ以降、1917年までの中国政府の海外留学政策の歴史は、その思想に注目して「軍事」(1872-1908)、「西政」(1908-08)、および「西藝」(1908-17)の三つの時期に分けられる。

19世紀末における中国の近代化運動は、その目的が外交や軍事力の強化に関わることに限られていた。そのため清朝政府が海外へ派遣した数百人の学生は、語学と軍事技術に関わった分野に集中し、物理学者となる者は、一人もいなかった。

「日清戦争」によって中国が敗戦の打撃を受けた結果、有識者たちは、日本のような近代国家の建設には、軍事力の強化だけではなく、制度的な改革が必要であることを学び、「憲法自強運動」と呼ばれる政治改革運動を興した。この中で伝統的な教育制度の改革は、彼らが目指した大きな目標の一つとなった。その目標の実現のために1万人を超える学生が日本に留学し、およそ8割の学生が法律、政治や師範の分野を学ぶようになった。そのうち高等師範などに進んだ者の中から最初の物理学者が現れた。こうした「西政」期に現れた物理学者の中で、日本への留学生が主流を占めた。一方中央政府によって派遣された最初の物理学を学ぶ留学生であった何育傑は、北京大学の前身であった京師大学堂からイギリスへ留学したが、彼の留学の目的も、将来の京師大学堂で専門教育を担うところにあった。以上のことから、近代的な学校教育制度の導入が、中国社会における物理学者誕生の最初の要因となったと考えられる。

「西芸」期においては、物理学者が次の歴史的な流れに生まれたものであった。清朝政府の海外留学方針の「西政」から「西芸」への転換は、前段階の日本留学に現れた問題を解決しようとしたものであった。その問題というのは、多くの日本留学生が法政や師範の分野に集中し、しかもその大多数が短期的な速成コースだけを卒業したことであった。清朝政府は、より高度な専門教育、とくに理工科人材の育成を求めようとしたが、義和団事件以後、列強に巨額の賠償金の支払いが迫られたため、十分な資金が捻出できなかった。その際、中国への運出に遅れをとったアメリカ政府は、義和団事件で中国が支払った賠償金の一部を返還し、それによってアメリカへ留学生を派遣することを清朝政府に要求した。清朝政府は、それらの留学生をアメリカの大学、特にその理工科に進学させるために、国内で予備教育を行う清華学校（今の清華大学の前身）を創設し、そこから毎年アメリカへ留学生を送るようにした。「庚款留学」と呼ばれたこのアメリカ政府の政策は、清朝政府の「西芸」を目指す海外留学計画を実現し、留学生の主流を日本からアメリカに転換させた。その中から多くの物理学者が現れた。この事実から中国における物理学者の誕生に対し、アメリカ政府の植民地政策の影響があったことは明かである。

第1世代の物理学者の国内の出身校を見ると、南洋公学卒業生の多かったことが注目される。南洋公学は、上海交通大学の前身で、19世紀末に工業界によって創設された近代的な学校であった。政府による近代の学校教育の制度がまだ整備されてなかった時期に、工業界が作ったこの学校で基礎教育を受けた多くの学生は、海外で物理学のような高度な理工系の専門教育を受けることになった。物理学者の誕生には、工業界に努力とその貢献を果たしていたと考えられる。

以上のことをまとめると、中国における物理学者の出現は、政府による上からの教育改革、工業界からの要求と努力、とアメリカ政府の植民地政策の三つの要素が互いに作用することによってもたらされた結果と言える。

第2章、専門教育の創設

第1世代の物理学者たちは、海外の留学先から帰国後、どんな仕事をなさったのか。本研究の調査によれば、彼らのほとんどが教育の職場に就いたことは、明かである。

清朝が倒れる以前に帰国した物理学者は、中学校や師範学校の教師になった。その代表

者であった何育傑は、前に述べたように大学の専門教員として育成されたにもかかわらず、結局中学校で理科と外国語を教えるようになった。この時期に帰国した物理学者が全て中等教育の職場に止まったのは、当時の大学には、物理学科がまだ存在していなかったためである。京師大学堂では、創設の当初、物理学科が将来設立することが計画されたが、実際 1910 年に理科大学が発足した際には、地質と化学の二つの学科しか設けられなかった。義和團事件以後、清朝政府は厳しい財政状況のなかで、近代化の計画が大きく圧縮されたため、地質や化学など当時の工業に関わっていた実用的な分野以外、物理学のような基礎科目の専門教育が実現できなかった。

1912 年に、辛亥革命によって封建王朝が打倒された。中華民国政府は、新しい教育システムの実施を前進させようとした。物理学科は、当時唯一の国立大学であった北京大学の中で発足し、また全国で新たに設立された 6 つの高等師範学校の中でも教えられるようになった。上にふれた清朝が倒れる以前に帰国した何育傑は、中等教育の職場から高等教育に移り、同じ時期に帰国した物理学者たちも、北京大学や高等師範学校のような高等教育機関で働くようになった。

1912 年に北京大学の物理学科が発足した当初、初代教授を務めていたのは、上に触れた何育傑に加えて、張大椿、夏元り、張善揚、李祖鴻ら五人がいた。彼らは、いずれもアメリカとヨーロッパから帰国した留学生であった。この時期の北京大学における物理学科は、理論物理学門と呼ばれた。理論物理学門の発足は、実験の設備がまだ整備されていないうちに、教員たちが教育に踏み切った一方面的な努力も反映したが、そのカリキュラムを見ると、当時の教育内容は、科目がまだ少ない上、原子論や相対論など 20 世紀の物理学の内容に触れていなかった。また実験に関しては、教員による演示実験以外、学生実験は行われていなかった。物理学実験は、近代物理学、さらに近代科学にとって重要な方法的な意味を持つものだが、それが無い教育は、専門教育と言ってもまだ不十分なものであった。中華民国成立後まもなく、辛亥革命を裏切った袁世凱は、北京大学を封建文化の拠点にしようとした。また伝統的な科学制度の影響が依然として残され、物理学科のような近代教育文化事業に対して社会からの関心がまだ薄かったため、この時期における北京大学の物理学科の建設は、1912 年のカリキュラムを 1917 年のものと対照してもわかるように、あまり大きく前進しなかった。

物理学の専門教育を本格的な段階に押し上げたのは、1919 年前後に帰国した物理学者であった。彼らの多くは、「西芸」の時期に留学し、以前の人たちと比べて専門家としての意識と意欲をいっそう強くもっていた。その代表者は、この時期に全国の新教育をリードした北京大学と、南京で新しく昇格した東南大学で、それぞれ物理学科の整備に取り組んでいた顧任光と胡剛復のグループであった。

北京大学の改革は、新文化運動によって支えられた。新文化運動は、先達の知識人が興した大きな社会改革運動で、近代中国における啓蒙運動の頂点と位置付けられている。新文化運動の一つの目標は、科学的方法によって中国の伝統文化を見直し、科学的な態度を以て中国社会の改革を求めようとするところにあった。その目標に沿って北京大学では、新しく着任した蔡元培学長は、科学的原理の教育の意義を強調し、理学部を充実させた。

この時期に北京大学の物理学科では、アメリカのシカゴ大学で博士号を受け取った顧任光、フランスのバリ大学で博士号を受けとった李書華、イギリスのバミンガム大学で修士

号を取得した丁燮林が教授陣の中核となった。顧任光たちは、物理学科を教育内容と実験の二つの面から整備することに取り組んだ。1920年前後の北京大学における物理学の専門教育のカリキュラムでは、内容的にも20世紀の物理学がすでに教えられるようになっている。また実験に関しても、学生実験の内容と設備の整備で実質的な成果を収めた。

他方、東南大学の改革は、地方産業界および中国科学社によってバックアップされた。第1次大戦中、ヨーロッパの列強が一時的に中国の市場を放棄したため、中国の民族産業は東南沿岸を中心に大きく発展した。この頃アメリカでは、理工科専門の留学生が中心に中国科学社という団体を結成し、その趣旨は、祖国の科学と実業の進歩をはかることであった。1918年に、中国科学社の中心メンバーの卒業と帰国に伴い、その本部はアメリカから国内の南京に移った。東南大学の前身は、南京高等師範学校であった。1920年に南京高等師範学校は、地方、特に産業界からの要求および援助の下で東南大学へ昇格した。理、工、農学部の教授には、おもに中国科学社の社員が就いた。物理学科の場合には、学科主任になった胡剛復は、中国科学社の創設にも加わった人物であった。1919年にハーバード大学で博士号を取得した彼と同じ時期に東南大学の物理教授を務めた熊正理も清華学校からアメリカへ派遣された留学生であった。後者はイリノイ大学で修士号を受けた。

東南大学の物理学科の主任を務めた当時、胡剛復は、中国科学社の理事も務めていた。彼が主役となった東南大学の物理学科の改革は、当時の北京大学とほぼ同じ程度の成果を収め、すなわち近代物理学の教育内容の充実と学生実験の導入の面において著しく前進を見せた。近代中国工業のもっとも発展していた東南沿岸地域で立ち上がった新しい大学として東南大学は、北京大学と一緒に「南高北大」と呼ばれ、当時全国の教育界でリーダーシップ的な存在となった。

従来の中国の近代化過程に関する研究では、特に日本と比較研究の場合に、上から、つまり政府主導の路線のみに着目する傾向が強く存在した。しかし、この時期の物理学の専門教育の改革は、上からの進め方によってではなく、新文化運動および新工業の振興運動という社会的な下からの改革によって、本質的な成果を収めたことが分かる。

第3章 物理学研究の開始

第2世代の登場に伴い、彼らの主な歴史的な課題は、物理学の研究を自国で推進させることであった。

中国における近代学校教育システムの導入の初期においても、研究機関を設立する計画があった。20世紀の初めの京師大学堂には、分科大学の上に大学院に相当する「通儒院」の設立が計画された。辛亥革命以後、民国政府の初代教育総長蔡元培は、ドイツ流の大学制度を取り入れようとして、大学に研究所の設置をはかった。蔡元培は、北京大学の学長に就任した1918年に、初めて大学の中で研究所の創設を試行した。しかし高等専門教育、特に物理実験室などの整備が充分でなかったため、以上の計画と努力は、いずれも中途半端に終わった。本格的に物理学の研究を行う研究機関の創設は、新文化運動と近代工業の成長によってもたらされた高等理工科教育進歩の中で実現されたものであった。

1927年の北伐の勝利に伴い、中国はあらためて政治的統一の局面を迎えるようになった。同じ年の4月に国民党は南京で国民政府を発足させた。新しい中央政権は、統一と独立の

国家建設を目指して、教育學術文化事業の近代化を、その政策の重要な柱とした。国家研究機関の設立は、その政策の課題の一つであった。一方この時期に国民政府の教育行政委員に任命された蔡元培、李石曾らは、いずれも教育における學術研究の重要性について深い見識を持つ教育家であり、彼らが新教育機関の中での研究機関の設立を熱心に推進した。

1927年に発足した新政権の教育行政システムは、おもに中央にある「大学院」（これは通常の大学院とは違うものです）と地方にある大学区によって構成された。国立中央研究院は、「大学院」の発足とともに1927年の11月に設立されたものであった。1928年の4月に中央研究院は、「大学院」から独立し、国民政府に直属する全国の最高學術研究機関となった。一方、北平研究院は、もともと地方の研究機関として、教育文化の中心地であった北平大学区の中で企画され、1929年8月に、教育部に直属する「国立北平研究院」という名前で正式に発足した。国立中央研究院と国立北平研究院の中に設けられた物理学の専門研究機関は、中国で現れた最初の物理学の専門研究機関であった。

国立研究機関の設立とともに、大学における物理学研究の制度的な整備も進んでいた。1928年の5月に、国民政府は、第一次全国教育会議を召集し、高等教育機関の中に研究院を設立することを定めた。前に触れた北京大学と東南大学は、1920年代の半ばから国内の政權の交替や経済不況の影響を受け、いずれも困難に陥ったため、研究院をすぐに設立できなかったが、その代わりに国立清華大学と私立燕京大学は、研究院の発足を始め、物理学の教育と研究に順調な発展を示していた。

清華大学は、清華学校から昇格された新しい国立大学であった。国内における高等教育の整備に伴い、より高度な教育を受けた学生の海外派遣の要求と、1940年に「庚子賠款」の返還が終了する以後、その影響力を維持するために、清華学校が1925年に大学への昇格を決め、1929年さらに大学院に相当する研究院を発足させた。アメリカの「一般教育」を重視する教育理念の影響を受けたため、清華の教育当局は、基礎科目である物理学科に最初の研究院のコースを開いた。

一方燕京大学は、1919年に発足したもので、それまでの三つのミッション系大学が合併した文理料総合大学であった。20世紀以後、中国における近代高等教育の発展が予想される中で、各直教団は、魅力ある大学を作るために、高等教育事業の連合を固り始めた。5つの直教団によって設立された燕京大学は、こうした連合事業のもっとも成功した例の一つであった。燕京大学では、1921年に哲学専攻の研究院課程が開かれ、1927年には物理学専攻の研究院課程が開かれた。

このような物理学研究の制度化は、漸く実現されたのに伴い、上に第2世代と呼ぶグループの物理学者たちが、登場し始めた。第1世代の物理学者と比べて、第2世代の物理学者には、次のような特徴があった。

まずその出身校においては、北京大学と東南大学の卒業生が多かった他、1920年代の後半からは、燕京、金陵、東呉などミッション系大学卒業生の増加が著しく、清華学校の卒業生が依然としてかなりの割合を占めていることも目を引く。ついで、海外留学の経験に関しては、第2世代の人たちの平均留学期間は約5年で、第1世代の人たちの約8年半より遙かに短くなった。それぞれの人々が修得した学位を見れば、第1世代の人たちでは、博士号を修得した人が約3割、修士号を修得した人が約2割、学部およびそれ以下（高等師範や専門学校）の卒業生が約5割を占めた。それに対して、第2世代の人たちは、博士

号を修得した人が約65%、修士号を修得ないしそれに相当するものが約33%、学部
の卒業生がわずか2%であった。国内の学校教育、とくに高等専門教育の水準の高まること
につれて、国内で大学や高等師範などを卒業してから留学する理工科分野の学生数が増え、
彼らの留学は、大学院コースに入って研究の訓練を受けることが主な目的になった。第2
世代の物理学者の相次いで帰国に伴って中国の物理学者たちは、国内の実験室で新しい
発見を求めようとする活動を本格的に開始した。

第4章. 国家による物理研究奨励と物理研究の実践

この章と次の章では、国立中央研究院と国立北平研究院、それから清華大学と燕京大学
を取り上げて、それぞれの現場で物理学の研究に取り組んでいた物理学者の活動を検討し
ていく。

国立中央研究院物理研究所が1928年に発足された当初、所長を勤めたのは、前北京
大学教授丁燮林であった。ほかに専任研究員を勤めた楊肇康、胡剛復、嚴濟慈は、いずれ
も前北京大学と東南大学の教授で、助手を勤めたのは、二つの大学の卒業生であった。

中央研究院物理研究所が発表した最初の研究計画には、4つの研究課題があった。それ
は、1) 地磁気、重力加速度および大気の測定に関する研究、2) 無線工学の研究、3)
原材料の物質性の検定に関する研究と、4) 以上の各分野において、特に国防に関わる問
題の研究であった。いずれにしても当時、国家の統一と独立に関わっていた問題であった。

所長丁燮林の下では、地磁気、重力加速度の測定に関わった研究が行われたが、彼らは、
地磁気や重力加速度を実際に測定したことがなかった。研究所に発表された研究報告書に
よると、丁燮林たちは、振り子理論の研究を行い、それに基づいて新しい加速度計を開発
した。この作業は、当時の重力加速度の測定にとって重要視されたものであった。丁燮林
たちは、また数年間かけて南京で地磁気の観測台を建設することに力を入れた。この観測
台を建設するために、丁燮林たちは多くの器具を自ら作った。これらの仕事から見て、丁
燮林たちは、直接の地磁気や重力加速度の測定を行わなかったが、彼らによる必要な道具
の開発と基礎施設の整備は、中央研究院物理研究所の研究にあらわれた大きな特徴の一つ
であることが明らかである。さらに丁燮林たちは、器具の開発過程において、中央研究院
物理研究所の自らの実験工場も整備してきた。この工場は、当時、実験研究器具の修理、
製造および開発することによって全国の教育と研究を支援した。国内の科学器具の製造業
がまだ未発達で、しかも研究の経費が限られていたために、丁燮林たちにとって器具の開
発は、研究を推進させるための重要な課題であった。それは、中央研究院が国家の最高科
学研究機関として科学研究を遂行させながら、科学研究の指導、連絡、奨励という任務も
果さなければならないという特別な立場から来た彼らの責任であった。

中央研究院物理研究所とは対照的に、それより一年遅れて創設された北平研究院物理研
究所のことだが、そこの初代所長を勤めた前北京大学教授李善羣と2代目の所長を務めた
嚴濟慈は、いずれもフランス留学生であった。

北平研究院物理研究所が発表した最初の研究計画は、1) 中国北部各地の経緯度、重力
加速度および地磁気の測定、2) ラジウム鉱の調査およびその放射能の研究と3) スペク
トルの吸収に関する研究といった3項目であった。国立の研究機関として北平研究院物理

研究所は、その研究計画の中に、中央研究院とおなじような応用研究を重視する傾向が現れたが、留学先からの影響を受けた彼らは、フランスで進んでいたラジウムの研究を自国へ導入しようとした意欲も示していた。

北平研究院の物理学者が発表した研究成果に注目されたのは、同じ地球物理学の研究にしても、彼らが中国北部や中部の重力加速度と経緯度の測定が中心に展開された。重力加速度の測定過程において北平研究院物理学者は、上海天文台のフランス宣教師と協力し、フランスで紹介された最新の測定器具を利用して、中国北部と中部の重力加速度での測定を行った。彼らの測定の結果もフランスの科学雑誌に掲載された。北平研究院の物理学者は、中央研究院の物理学者と違って、道具の開発ではなく、実質的な測定に踏み込み、その研究過程に対してはフランスからの影響があった。北平研究院におけるスペクトルとラジウムに関する研究は、主に1931年に所長になった熊清越のもとで行われたものであった。その多くの研究論文が、フランスの科学雑誌に掲載された。

中央研究院と北平研究院の物理学者たちは、上に述べたようにいずれも応用研究を重視して研究活動を進めていた。しかしこれらの応用研究は、当時の中国社会において実際に応用されるまで到達していなかった。中央研究院の場合には、物理学者たちによって開発された道具を利用して、全国的規模の研究活動を行うことは、結局実現されなかった。一方北平研究院の物理学者たちの研究成果に対して、応用価値が高いという評価があったが、国内の生産技術がそれらの成果を応用できる水準に到達していなかったため、それらの研究の応用は外国でしか実現されなかった。

第5章 大学における教育と研究の活動

国立の専門研究機関で物理学者たちが研究環境の整備と研究を押し進めていた時期に、大学の物理学者たちも、専門教育の整備を進めた上、研究業績も上がりはじめた。

まず清華大学については、その有名な五大教授になった葉企孫、呉有訓、薩本植、周培源、趙忠尧は、皆アメリカ留学生で、呉有訓を除いて、いずれも清華学校からアメリカ留学した者であった。清華大学では、従来の教育者より、研究者の養成を教育の第1の目標として、その目標を目指して、教授たちが教育の内容と実験設備の整備に積極的に関与した。「研究者の育成を目指す教育機関は、自らも研究の中心地の一つにならなければならない」。この認識に基づいて、清華大学の教授たちは、科学を必要とする人材の養成だけでなく、自らの学術研究にも力を入れた。

清華大学の物理学者は、研究の目標に関して、上に述べた国立研究機関の物理学者たちと違って、独自の考えを持っていた。中央研究院の物理学者は、国家の独立と統一事業の下で、応用研究に対する努力を続けた。それに対し、清華の物理学者たちは、中国人が自分たちの学術研究の成果によって世界に貢献し、世界の民族と同等な地位に立つて研究を追求すべきであると考えていた。清華大学の物理学者が発表した多くの研究成果には、次の特徴があった。まず第1に、清華の教授たちの国内での研究成果のほとんどが、彼らが留学先で行った研究に関わるものであった。自国の学術研究を世界に認められる段階に推進させるために、自分たちが留学先で行った研究を国内で引き継いで行う方向性は、もっとも効率的な選択であった。次に、清華大学における物理学の研究成果には、当時、国内

外で認められる成果が多かった。呉有訓、趙忠尧の研究はその代表的なものであった。1930年に呉有訓がイギリスの Nature 誌で発表したX線の散乱問題に関する研究論文は、中国物理学者の国内における研究が初めて海外で発表されたものと言われている。清華大学の物理学者の研究成果の多くは、『国立清華大学理科報告』に発表された。そこに載せられた論文は、すべて海外の学術研究概要に掲載された。ただし、上に述べた呉有訓と趙忠尧の研究成果は、いずれも彼らが帰国後、初期に行った研究であった。すなわち清華大学の物理学者は帰国の初期には、それらの研究によって国際的な先端に追いつくことができたが、世界の科学が進んでいくにつれて、彼らは、次第に研究の先端から離れていった。研究の水準を保つために、清華大学は、5年に1度の教授休暇制度を導入したが、国内の研究基盤が整備されていないうちに、呉有訓たちが求めていた、世界に認められる成果の創出は、結局海外に依存しなければならなかった。

一方燕京大学における物理学の教育と研究については、1920年代には外国人教師が主導していた。1930年代に入ると国民政府は、ほとんどのミッション系大学を中国政府に登録し、改めて私立大学として再出発させた。それに伴いミッション系の高等教育事業は、中国人教師が主導するようになった。燕京大学の物理学科でも、中国人物理学者が、次第に外国人教師に代わって主役を演じるようになった。燕京大学の物理学者は、清華大学と同じように、ほとんどアメリカへの留学生であった。また彼らは、すべて燕京大学あるいはその前身の大学の出身者であった。

燕京大学では、1920年代から清華大学と同じように研究者の育成が教育目的の一つとされ、大学院に当たる研究部のコースが開かれた。また、ロックフェラー財団が中国で経営していた協和医科大学は、欧米と同じ水準の医学教育を目指して、学生に対する、科学の基礎教育を燕京大学の理学部で行うようにした。そのために、ロックフェラー財団は、燕京大学理学部に対して人員の訓練、設備の充実と資金の提供などの面から援助を行なった。この条件を利用して、燕京大学の物理学者は、物理学の教育と研究を大きく発展させることに成功した。

燕京大学の物理学者に発表された多くの研究成果には、次の特徴があった。彼らは、清華大学の物理学者と同じように、アメリカ留学の経験を持っていたが、彼らの帰国後の研究には、留学先の研究に続くものがほとんど見当たらず、「北平地域の日光放射についての観測」のような中国の自然環境を対象にした研究や、「北平の泉水に含まれる放射性気体の測定」のような人の健康に関わるような研究が多かった。1930年代以後、ミッション系大学の世俗化と中国化が進む中で、研究者たちは、応用研究へ傾く傾向を持ったが、燕京大学で行われた応用研究は、中央研究院と北平研究院で強調された国家の統一と独立事業に関わった分野と違って、特に人の健康や農業に関連するものが中心であった。こうした農業や国民の健康に関わるという研究の特徴は、当時ロックフェラー財団が中国で推進していた医療教育事業との関連から生まれたものと考えられる。

第6章 中国物理学会の成立及びその活動

1930年代の初めに、中国の物理学は、上に検討してきたように、専門教育と研究機関の整備がなされつつあったが、抱えていた問題は、おもに二つあった。一つは、各国で

物理学を学ぶ留学生人数の増加に伴い、それぞれの国から帰国した物理学者は、特定の研究機関に集中する傾向が著しくなってきた。1920年代の前半以前、帰国した人たちは、日本留学生がもっとも多かったが、彼らは、北京師範大学を始め、各地の高等師範教育機関に集中していた。1920年代の後半以降、形成されたいくつかの物理学の教育と研究の中心を見れば、清華大学はアメリカ留学生が中心、中法大学および北平研究院はフランス留学生が中心、北京師範大学は日本留学生が中心、というような現象が著しく見られるようになった。それぞれのグループの間の物理学者の互いの連絡より、むしろそれぞれの留学先との繋がりが強かった。こうした分離状態の中で行われた物理学の教育と研究は、中国にとって半植民地的なものであった。もう一つは、これまでの高等専門教育の発展に対して、中学校や高校レベルの基礎教育が整備されていなかったことである。海外で高度な専門教育を受けた物理学者たちは、帰国後ほとんど高等教育と研究機関の職に就き、中等教育に手を加えたものが稀わずかであった。この時期に出版された中等教科書はまだ少なかった。何人かを除いて、ほとんどの著者は、物理学者ではなく、いろいろな出版物を翻訳、紹介した翻訳者であった。

1931年の9月に、中国政府の要求を応じて、国際連盟の教育視察団は、中国を視察した。視察団は、これまでの中国の教育と学術研究事業に存在していた上述の二つの問題について、初等教育と中等教育の重要性を強調した上、中国の近代化そのものは、日本モデル、ヨーロッパモデルとくに当時、支配的な地位を占めたアメリカモデルになることではなく、中国自らの美しい歴史伝統を生かして、すべての先進文明からよい要素を取り入れて作り出すものを目指すべきであると指摘した。視察団の意見は、その記述によれば、いろいろな中国の専門家の意見を聞いた上、自らの目で確認したものであるという点からいえば、上述の見方は、当時の中国の有識者の認識も十分反映されたものであった。

1932年の10月に視察団が北京に訪れた際に、そのメンバーの一人、フランスの物理学者 Langevin は、中国物理学会を作って、物理学の全国での発展を図るよう呼びかけた。それをきっかけに中国の物理学者たちは、中国物理学会の創設に向けて本格的に動きを出した。1932年8月23日に、中国物理学会の設立大会が、清華大学の科学館で行われ、中国物理学会が「中国における物理学の進歩および普及をはかる」ことをその目的として掲げた。設立の半年後の1933年の3月に、中国物理学会の入会者の数は88人に達した。

中国物理学会は、毎年1回の総会を開き、三つの事業を起こすことを決定しました。すなわち、1) 学会誌の発行、2) 物理学用語の訳語の標準化の推進、3) 物理学の中等教育の改善ということであった。それらの事業は、いずれも前に述べた半植民地的な物理学者の社会的分離状態の打破、そして中等教育と高等専門教育、あるいは教育と研究の統合を目指す努力であった。中国物理学会の設立とその事業の展開には、中国における物理学は一つの統合的な方向性が現れてきた。

まず、従来、アメリカ留学生の拠点となっていた清華大学に、変化が生じはじめた。1936年にイギリスのケンブリッジ大学で研究に従事した曹叡権が帰国し、清華大学の教授に就任した。曹の教授就任は、清華大学が1920年代のアメリカ依存的な設立目的から離れたことを意味した。北平研究院においても、もともと助手を務めていた若者たちのほとんどは、北京大学や大同大学の卒業生で、李善華や嚴濟慈の学生であった。1930年代の半ばに近づくと、これらの若手研究者の中から、アメリカやイギリスへ留学するものが増えた。

また新たに助手に就く人は清華大学や燕京大学の卒業生が多くなった。

こうしたさまざまな流れの統合は、西洋の近代学術の中国化の現れであった。その中で中国政府は、研究人材の養成に関しても、海外への留学生の派遣を中心とした従来の方針から、国内の研究施設でその養成を行うという方針に政策を変化させた。また、海外へ派遣される留学生に対しても、事前に国内での研究経験を持つことが求められた。

このように、従来の半植民地的な研究者の社会的分離状態が打破された中で生まれた物理学者を、ここでは第3世代の物理学者と呼びたいと思う。前の世代と比べて、第3世代の物理学者の特徴は、留学の前に、国内の研究施設で国内の研究者の下で研究を行った経験がある。1937年の日中戦争の勃発の際に、この世代の多数は、まだ海外での勉学と研究を継続していた。

終 章 まとめと結論

20世紀のはじめに、列強の中国に対する侵略と、それに伴う中国自身の近代化という時代背景の中で、海外で教育と研究の訓練を受けた中国の物理学者たちは、自国で専門教育と研究の実現を目指して活動を展開していた。その過程は、中国人物理学者の自らの集団の形成過程でもあった。この時期に中国の物理学者たちの活動は、中国社会自身の近代化の流れから見れば、上から行われた政治的な改革と、下から行われた社会的改革によって支えられたものであった。

しかし、この時期に西洋から移植された物理学には、中国で自立するようになるまで、とくに教育、研究および応用という三つの面から見て、まだ大きな課題が残されていた。本研究で特に指摘したいのは、次の二つのことである。すなわち工業の基盤から離れていたこと、そして近代物理学が持つ科学的な精神の移植があまりなされていなかったこと、この二つの点は、1937年以前に行われた近代物理学の中国への移植に残された大きな課題であった。

主な参考文献：

- 舒新城『近代中国留学史』、中華書局、1926。
 多賀秋五郎『中国近代教育史資料』、日本学術振興会、昭和47年
 "Who's Who of American Returned Students", Tsing Hua College, 1917.
 Tong-Li Yuan "A Guide to Doctoral Dissertations by Chinese Students in America 1905-1980", Sino-American Cultural Society, Inc. Washington, D.C.
 房兆楹『清末民初洋学学生題名録初輯』、精華印書館（台湾）、民国51（1962）年。
 貝祖瀾主編『国立北京大学記念刊』、伝記文学出版社、民国60（1971）年。
 『国立東南大学一覽』、民国12（1923）年。
 『国立中央研究院總報告』、国立中央研究院總弁事処発行。
 『国立北平研究院院務彙報』、国立北平研究院總弁事処発行
 『交通大学校史資料選編』、西安交通大学出版社、1986年。
 『清華大学史料選編』、清華大学出版社、他。

植民地期朝鮮の工業化の技術史的検討

A Research on the Industrialization of Korea in the Colonial Era
from the Point of view of History of Technology

指導教官 木本忠昭教授

著者

SYNOPSIS

In this thesis I analyzed the machine production in colonial era of Korea and proved the fact that their main purpose was only the supply of the raw material for Japanese industry and productions did not conclude in Korea and its technological level was controlled by the requirement of Japanese industry. I defined this type of industry as a resource plundering industry.

In addition, I categorized the most of Korean industry which had grown in 1930s by the character of the representation of production between Korea and Japan.

I set the resource plundering industry as category 1. Japanese colonist capital in Korea such as Korean fertilized company (Chosen Chisso) the subsidiary of Japanese fertilized company (Nihon Chisso) or Japan High Frequency (Nihon Kwanaha) they pursued to conclude the production in Korea as category 2. Next, I make substitute production for imported products as category 3. They mainly depended on the raw materials and means of production from Japan. The last, small Korean national industries are category 4. They resemble in category 3, only differs the nationality of capitalist.

In the war times, civilian industries such as category 3 and 4 were reduced very quickly. The resource plundering industry, category 1 was extended and strengthened with some of new technologies. The category 2, the industries of Japanese colonist capital in Korea had some of its basement mobilized the military industry actively. And in this time there were made the industry of direct production of weapons, which may be called category 5. But there were only very poor industry system in Korea, they could not have succeed.

Through the these proofs, I advocate the theory of three fold structure substitute for the theory of dual structure which consist of Japanese military industries and small Korean national industries. The three folds consist of the colonial industries (category 1 and 3), the industries of Japanese colonist capital in Korea (category 2), and small Korean national industries. The establishment of the category 2 made the crevasse between the 1st one and 3rd one bury. Now we can examine the industry of Korea in colonial era suitably.

And I proved the activity of the Korean Fertilized Company as a Japanese colonist capital in Korea and the its relation of the policy of the Government-General of Korea.

第1章 問題設定

日本による植民地期の朝鮮で定められた工業化は、植民地支配と同時に早期から植民地を産業化(工業化)するという点で、インドを除く世界の植民地支配政策史の中に傑出を見ない。これまで植民地期朝鮮の工業化については、主として経済史の側面から経済分析が行われてきた。

例えば植民地期に行われた工業化が本質的に軍需工業であったとする金哲の『韓国の人口と経済』(1965)や、軍需工業としての朝鮮の工業を日本の帝国主義政策の中に位置付ける小林英夫の「一九三〇年代朝鮮「工業化」政策の展開過程」(1987)および『「大東亜共栄圏」の形成と崩壊』(1975)は、日本の資本が朝鮮で建設した工業について、主として戦時期の軍事動員の実態から軍需工業と規定している。これに対して朴玄埈は『韓国資本主義論』(1983)の中で、軍需工業という性格規定を踏襲しながら、軍需工業に対する独自の民族経済の存在を強く主張した。日本による軍需工業とは別に食料と原料加工部門を中心とした民族経済の存在を強く主張し、軍需工業論に対する二重構造論を提示したが、民族経済の実態に関する分析はなされ

ないまま残された。

福和男は『朝鮮工業化の史的分析』(1995)の中でこれらの見解を批判的に検討し、これら先行研究を植民地期の朝鮮の工業化を日本による軍需工業部門と民族経済の二重構造論として一括した。その上で福和は、実態分析と統計分析で資本主義形成過程を解明することを自己の目的の一つと規定し、金哲や朴玄埈の「間定的な二重構造論的記述」を止揚して、資本主義の発達を解明することを課題とした。それまでの研究が軍需工業としての性格を過度に強調していたのに対して、福和は植民地期の朝鮮社会における資本主義形成過程の解明を主題において、植民地期朝鮮の工業の実態分析を行おうとした。また、統計的分析と各種調査の生産の成長の分析により1930年代後半に不可逆的な本源的蓄積が進行したことを明らかにした。しかし、福和の研究は本源的蓄積の進行を示すに止まり、工業の性格規定に踏みこんでいない。二重構造論のように性格規定を優先する立場から離れて実態分析を行うことは重要な作業ではある。しかし、その分析結果がそれまでの性格規定の当否を検討する段階にいたってこそ、新しい視点の有効性が

先揮される。また、この研究は朝鮮の工業製品の市場拡大として工業の発達を把握し、この発達を市場メカニズムに帰するが、生産力の分析には立入っていない。

以上見てきた経済史的な立場からの研究は、生産関係を分析の中心課題とするという、いわば狭義の経済史に内在する手法のために、植民地における生産関係を再確認することとまっていた。この限界を打破するには、植民地における工業と技術の発達のメカニズムの分析、すなわち技術史的な分析が必要である。

この他にも生産技術までも視野に入れて分析した研究として日本の工業史の一端として植民地を分析した製糸業の藤井光男、製鉄業の森倉文二、鉄道業の高橋泰隆などの研究。また民族工業としては、平壤のメリヤス産業を分析した栗村秀樹の先駆的研究を初め、近年に入って民族資本による工業の勃興、発達過程に関する個別実証的な研究が蓄積されてきた。しかし、これらの研究は個別分野を対象としたものであり、植民地期の朝鮮の工業全体の特徴の解明には至っていない。

生産過程に立入った技術的分析の必要性は、アメリカの経済史家ローレンバークなどにより経済史的立場からも提起されている。従来の技術史研究は主として、ヨーロッパと北米で世界の他の地域に先んじて進められた産業革命を対象としていたが、その商品の市場と原料の供給を少なからず植民地、後進国に求めており、産業革命の全体像を解明するためには、これらの地域との全体的な関わりまでを示す必要がある。このことは、朝鮮を植民地としていた日本の産業革命と工業の発達を分析するに当たっても欠かさない視点である。特に欧米に遅れて発達した日本の資本主義の発展の実態解明をさらに進めるためにも欠かさない作業の一つであるが、その作業には日本と朝鮮との技術的な相互関係の分析が必要になる。しかし、植民地において開発が進められた工業技術の発達とそれに関する技術史的な分析は未だ充分になされておらず、このことは朝鮮史においても未だに適合する。このように植民地期朝鮮における技術発達の解明は重要な研究課題として成立する。

これらのことを踏まえた上で本研究では、宗主国—植民地の分業の相互関係の発展構造、原材料の供給関係、製品の市場構造に着目して、植民地経済における技術の展開の実態を分析する。ここでは生産の機械化への移行を技術発達の目安とし、機械制生産への移行と発達過程を分析する。さらにこうした基本的な関係を踏まえながら、主要な工業分野の全体を網羅して、実際の生産技術の発達または停滞の様子を明らかにする。このことを通して、従来単純に植民地工業の主要構成要素として軍需工業と呼ばれていたものの性格を再吟味する。

分析作業としては、まず植民地期の朝鮮で機械制生産が進められた各個別分野の特徴を明らかにする。次に、これを整理して各時期ごとの工業の展開過程を全体的に把握すると共に、ここに植民地政策が与えた影響を具体的に解明する。また、これらの工業を支えた（または支えなかった）研究機関の活動と技術者教育の特徴を具体的に明らかにする。なお、技術史的な分析を徹底して行うには技術と労働の関係をも分析の対象とすべきであるが、本論文では先行研究の工業史的な分析の枠組を再検討することに主眼を置くことにする。技術の歴史的な分析や労働の分析にまでは立入らない。

分析の手法としては、時代的変遷にしたがって分析する。

1906年の保護国化から1930年頃までの日本への原料供給を目的とした工業が発達した第1期。次に朝鮮が満蒙を開始した1930年代初頭から工業生産額が急速に増大した第2期。最後に1937年の日中戦争勃発後にこれらの工業が戦時生産に動員された第3期と区分して分析を進める。

以上のように本論文は、植民地期朝鮮における工業発展を宗主国との関係を見ながら生産の展開や技術の相互関係を立入って分析することを課題とするものである。

第2章 1930年代以前の工業化の階層面と技術的分析

本章では、1930年代の工業化の時代以前の朝鮮で技術進歩の過程をなす機械制生産の発達を、その遅延した分野の特徴と宗主国との経済的関係を通して明らかにするとともに、その過程で展開された技術の進展状況を検討する。

第1節 鉱業資源収奪としての金鉱業の発達と鎮南浦製鉄所の技術的限界

朝鮮の金鉱は19世紀末から欧米列強の収奪対象とされ、次々と特許権が付与されていった。列強による鉱業開発では、朝鮮の一般的な技術水準と異なる高水準の技術が投入され、1919年の植民地化以前から収奪のための機械制生産という構造が作られていた。雲山を代表とする特許鉱山に欧米の先進的な鉱山技術が投入される一方、中小の鉱山では物大割とよばれる悪質割が主流を占めていた。特許鉱山が長期にわたる特許権と有価な鉱脈を背景に次々と採掘機械を投入し深部への探鉱を進めていったのに対し、3ヶ月〜6ヶ月の短い期間で勝負契約が終了する鉱山は、機部を中心に手廻り見鉱部を振り回した。このような植民地労働力の利用形態は固定資本を投じた大規模な開発よりも、原始的な手法による収奪的経営を支えることになり、製鉄技術をもて青化法よりも原始的な還元法がながく残存した。

この状態からの新たな技術設備を画するものとして、1915年に設立された乾式製鉄の鎮南浦製鉄所があった。日本の鉱業資本の多くは朝鮮に買鉱所を開設していたが、乾式製鉄で朝鮮唯一のものであった鎮南浦製鉄所は、電気製鋼工程を欠いたため粗鋼、粗鉛といった半製品生産にとどまり、実質的に佐賀製鉄所の分工場に過ぎなかった。このため、日立、佐賀鋼に匹敵する規模の大製鉄所が建設されたにもかかわらず、非鉄金属工業へと発達する道は初めから閉ざされていた。

第2節 朝鮮の鉄鉱石資源の重要性和兼二種製鉄所の技術的特徴

朝鮮の鉄鉱石は、日本の鉄鋼業を支える重要な原鉱として、植民地化以前から開発されていた。鉄石運搬用の軽便鉄道の建設をはじめ、資源収奪の現場には高い技術が次々と投入された。製鉄を中心に計画された三菱の兼二種製鉄所は、三菱が獲得した多くの鉄山とともに日本への原料供給の便をはかるものであり、当初計画では本振浦、鞍山のような植民地の鉄鉱資源を既成として日本に供給する半製品工場であった。海軍と結びついた本振浦、国家資本が投入された鞍山と同様に、兼二種製鉄所は、朝鮮の鉄鉱資源を、朝鮮總督府との密接な結びつきのもとで三菱が取得して日本に鉄鋼を供給するために設立したものであった。第1次大戦による鉄の輸入途絶は、軍需を含めた日本の造船業にとって大きな問題となった。ここで急遽計画されたのが兼二種の製鋼、圧延工場であるが、これは長崎造船所製鋼工場と兼二種製鉄所の技術的連関が乏しいことに見られるように、長崎神戸の両三菱造船所よりも国家資本たる八幡との関係を計画されたものであった。実現された圧延工場は厚板を中心とした造船用鋼板の要出を主としたが、分塊ロールの設置に見られるように、八幡への第1段圧延後の小

領地の供給も予定されていた。しかし、八幡自身でさえ危機に陥ったワシントン軍縮会議後の需要減の影響にさらされた兼二製鉄所製鋼工程工場は、八幡のように民衆と競争することもできないまま休止された。この結果、兼二道には本来の日本向け鉄鉄供給の需要のみ残された。このように朝鮮の鉄鋼需要とは無関係に進められた兼二道の操業は、朝鮮の鉄鉄需要に対する日本の要求の変化によって左右されるものであった。

第3章 日本の製糸企業の進出と家内制製糸業の拡大の2重構造

日本による収奪の対象は鉱物資源にとどまらず、日本の主要な外貨獲得源であった生糸など繊維原料も対象とされた。植民地となった朝鮮では絹の生産が奨励され、これは日本への移入。または日本資本が朝鮮に設立した製糸工場で生糸に紡がれて輸出品となった。日本への絹の移入を目的に搾取の増大が図られた朝鮮の製糸業は、1920年代以降、外貨獲得のための機械製生糸へと進んだ。このような原料供給からその原料加工に関する工程までにとどまる技術先進は資源収奪型工業の特徴といえる。日本の製糸業者は生糸の輸出に依存していたため、朝鮮の機械製糸と直接競争する関係ではなかった。このことが、朝鮮での機械製糸の発達を許容した要因であった。ただし、総督府の政策的抑制により、民族資本による機械製糸業者が成長することはなかった。

このような半製品である生糸生産の増大が、機械紡績業への発達を促すことにはなかった。また、獨立量を増大させることによる機械製糸用原料産の増産は、機械製糸に適さない層の増大を招いた。このため、機械製糸の増大が家内工業制の製糸業を増大させるという一見矛盾する状況を生じた。ここに収奪のための機械製生糸の増産が、朝鮮の製糸業全体の構図を歪めた状況を見ることが出来る。

第4章 朝鮮の綿業の宗主国主権下への再編成—綿業の発達と紡績技術の停滞

明治期の日本が、その生命線として海外市場の獲得に努めた綿糸の場合にも、日本の植民地経営方針が直接反映した。1875年の開港以来、かつて綿布の輸出国であった朝鮮の綿布業は中国を経由するイギリス綿布と日本綿布の間にその市場を失いつつあった。特に日本の綿糸の流入により、朝鮮で行われていた綿布の商品生産の発達は抑制され、同時に進行した朝鮮の綿業を日本への食料供給目的に従属させる動きの中で、朝鮮の農家における家内制綿業も衰退していった。一方、輸入棉花に依存して操業する日本の紡績資本は朝鮮の棉作地帯に着目し、1906年の保護国化後に設けられた植民地を巡って朝鮮南部の農家に対して綿地棉の作付を奨励した。これは早く綿織物の問題に止まらな。それまでの家内手工業的なものとはいえ、棉花の栽培から繰綿、打綿、梳綿、紡績、紡績と続けられる生産の体系が打ち壊された。この綿業の生産の体系の崩壊により、朝鮮の綿業は決定的に日本に従属することになった。その結果、日本への原料供給を目的とする機械製糸においてのみ機械化が進められ、朝鮮の綿業は日本の綿糸の市場として再編成されていった。日本の紡績資本による朝鮮産棉花への要求は、棉花による移入から繰綿による移入へと形態を変え、1920年代までには本棉を中心に工場制の繰綿業を発達させた。しかし、打綿工程において紡績原料としての品質と価格の調整を行うことで世界市場に安価な綿糸を提供して来た当時の日本の紡績資本は、繰綿以降の工程を管理下に置いていた。このため、朝鮮は日本への棉花—繰綿の供給地であると共に、日本の綿糸の市場と位置付けられ、この間を結ぶべき紡績業の機械化は抑制されていた。

1920年代に始まった大工場制の紡績業は、綿産地である朝鮮の原料基盤と離れたところで進められた。しかし、生産統計に乗りたくないような環境の中で手織、繰打、手紡、手織という生産形態がその形を少しづつ変えながらも維持されていた。これは農家の副業生産としての手紡糸の生産を基盤としたために進ることができたが、そのことは同時に手紡糸を基盤とする綿糸の原価や供給量の削減を生じさせた。そのため、日本産綿布が市場の大部分を支配する中では、農村の家内手工業から工場制紡績業への発達を見ることはできなかった。

日本への原料移入を目的とする繰綿工程までの機械化の進展は、それを基盤とする紡績工程を朝鮮で持たないことにより、より一層植民地における工業発達の偏在性を明確に示すものである。日本から進出した機械紡績業は日本産紡績糸を原料に操業したのであって、綿産地である朝鮮の棉花とは直接の関連を持つことはなかった。朝鮮業が紡績に進出する際にも大阪棉花市場から原料調達するなど、朝鮮の綿業には日本への原料供給を目的とした繰綿業と、日本資本による朝鮮市場の支配を目的とした紡績業との明確な二重構造が形成されていた。また、仕上げ染工程の機械化も大規模紡績工場の中で進められたものであり、これを分業の一環として利用する業者を育成するものではなかった。こうした綿業の分業工程の要求する部分に日本に置かれた状況は、総督府の強制作付政策と相俟って、朝鮮における綿業の家内制生産から工場制生産への自律的な発達を抑制する方向に働いた。

小括 1930年代以前の朝鮮における資源収奪型工業の形成とその技術展開の特徴

この時期の工業化の特徴は列強による朝鮮の資源の収奪とそのための技術にあった。それが最もはっきりと現われたのは第一次列強による資源の分野と日本による繰綿産地の分野であった。植民地期の前半期に朝鮮で成立した工場制の企業は、植民地の朝鮮の工業の発達に直接結びつかないばかりか、かえってその存在が朝鮮社会の中で低水準の技術を長く存在させる原因になった。製鉄や綿業に特徴的に見られるように、宗主国側の必要に応じた形で植民地の資源を移出できるように加工するものに止まっており、それらの工場は日本に置かれた工場と結び付けられて始めて生産を完結させた。そのため、朝鮮で進められた機械制生産の発達水準は、宗主国が原材料の加工に要求する水準によって規定され、その水準を超える技術発達は強く抑制されていた。このような工業の形態を本論文では資源収奪型工業と呼ぶ。1930年代に進められた多様な工業化以前には、実質的には以上見てきたような資源収奪型工業のみ推進されていたのであった。

第3章 1930年代朝鮮工業の技術発達の諸形態

第1節 1930年代の工業化と4つの類型

1930年代に入ると朝鮮の産業開始のみならず、機械工業を初めとして多様な工業が朝鮮で発達した。この多くは、縦横経済が日々強化される日本から植民地域外とされた朝鮮への企業進出であった。植民地期朝鮮の工業化を論ずる場合、単に量的な伸長だけでなく、その展開の要因や相互の関係が明らかにされねばならない。日本企業の朝鮮への進出を、資源や生産物の流れに立ち入って分析すると、前章で見た資源収奪型工業も拡大強化され、1930年代の朝鮮では、それぞれ異なる性格の工業が並立していたことが判明する。こうした生産の関係を説明することが、植民地工業の特徴を抽出することにつながると考えられる。したがって、朝鮮の工業の特徴を分析するに当たって、宗主国との

別に結ばれていた関係に着目しながら、1930年代、および日中戦争勃発前までに朝鮮で発達した各種工業を分類し、以下の各節で示す4つの類型に分類して生産の発達の様相を分析する。また、この工業の発達を支え、あるいは支えなかった工業教育の実態も明らかにする。

なお、朝鮮の工業化の代表的存在である朝鮮農産肥料には、朝鮮の電力資源を利用して主として日本市場向けの肥料生産を行なった資源取寄型工業の側面と、朝鮮総督府の産業政策に沿いながら多角化を進め、その中で化学工業の技術基盤を確立していったこれとは異なる側面がみられる。本論文では、従来見過ごされてきた総督府の産業政策とのかかわりに注目しながら朝鮮の技術の展開をその原因とともに分析するが、これは工業化の中心的位置を占めるために次章でまとめて取り上げることとする。

第2節 資源取寄型工業—類型1

1. 金鉱業と製鉄業の発達

1930年代に入ると日本の軍備工業化に伴って経済用の金の需要が増大した。このため、朝鮮でも金鉱業が積極的に奨励された。機械掘削を主とする奨励策は、深部への採鉱と低品位鉱の増産をもたらし、従来の選鉱法を主とする原始的製錬法では対応できなくなった。ここで焙化製錬と浮遊選鉱法を組合わせた新たな選鉱製錬工程が広く採用された。この普及にあたっては、總督府の燃料選鉱研究所が主導的な役割を果たした。

2. 日独参加前後の第二種と八幡との結びつき

1930年前後するうちに第二種で定められた高炉の増設策、製鋼圧延工場の新設などは、強基性平炉鉄の生産増大に迫った改修内容から判断されるように、八幡製鉄所や昭和製鋼所計画と連動したものであった。このように技術発達が宗主国の要求に規定されていたことを確認できる。

3. 新たな取寄工業の開拓—人絹用バルブと皮革

資源取寄型工業は量的に拡大にとどまらず、その対象も拡大されていった。その代表として1937年から操業を開始した王子製紙系北鮮製紙化学工業による人絹用バルブ製造と、1934年から始められた總督府の皮革の被褥作付と結びついた帝國製革の軍需用の皮革の生産があった。北鮮製紙の計画は、当時勃興しつつあった朝鮮の人絹紡績業と直接の連関を持たず、帝國製革も紡績など主要工程を日本に依存していた。いずれも日本の工業向けの原料生産を行う典型的な資源取寄型工業であった。

第3節 在朝鮮日本資本による原料からの一貫生産—類型2

1. 乾式製錬所の新増設と精錬工程の確立

前節で見た金の増産奨励の結果、湿式製錬では鉱石の処理が間に合わず乾式系朝鮮製錬長項製錬所（1935年操業開始）や日独系朝鮮製錬業興南製錬所（1933年操業開始）など新しい乾式製錬所が建設された。これらは電気精錬工程まで朝鮮で行い、朝鮮で生産を完結させようとした。こうした動きは、資源取寄型工業を推進する宗主国資本との対立へと進み、朝鮮製錬の伸張工業計画は、商工省を動員した日本の神鋼資本によって抑制された。

2. 朝鮮殖産銀行による日本高麗被重工業設立とその技術的特徴

八幡が引き取りを拒否した利原鉄山の粉鉱を原料とした日本高麗被は、日本の鉄鋼業と直接原料面で関係しないために、朝鮮での生産が可能だった。特殊鋼生産を主目的とする日本高麗被であるが、實質的に朝鮮で最大の圧延業者として、民需品生産にも対応する設備を有していた。

3. 醤油搾油業と油煎工業に見る原料加工から工場制への発展

日本の硬化油製造業の主要原料を供給した朝鮮の醤油製造業は、1920年代半ばの急激な増大に伴って成立した。初期の醤油製造業は、多数の朝鮮人農民の副業的な小規模の圧搾業者と日本人資本による機械製工場が混在して、在米型の小規模家内工業と機械製工場が並立していた。そして、1930年の不況を契機とした醤油販売統制組合の成立は、日本側の需要者に対して生産統制を行わせるほどの力をもち、朝蜜のグリセリン製造や朝鮮油脂のように原料基盤をもつ朝鮮への工場進出も行われた。こうした硬化油製造業の成立は、搾油業における工場制生産をうながした。しかし、關税において市着割の普及と搾取統制により原料は日本人に有利に確保されたことから、朝鮮人による工場制の醤油製造業は日本人に対して遅れたままであった。

第4節 移入品代替生産工業、その技術の体系的発展と限界—類型3

1. 綿紡績の朝鮮進出と日本資本による朝鮮の綿業の一貫化

綿織産業では日本での競争を反映してか朝鮮で生産を一貫化する方向に徐々に進んだ。しかし、これは日本の紡績資本が工場のみ朝鮮に移したものであり、東洋紡（1934年仁川工場操業開始）、鐘紡（1935年全南工場操業開始）の進出で綿業が朝鮮の輸出商品となっても、朝鮮は日本産綿糸を大量に移入し続けた。この中で鐘紡が朝鮮棉花の繊維を原料の一つとして操業したことは、日本の植民地政策の中で一度は分割された朝鮮の綿業の工程が、日本資本の手で再統合した点で一つの契機であり、朝鮮の綿業が臨時体制の中で積極的に軍需動員される下地ともなった。鐘紡による朝鮮の綿業の再統合は、類型3に属する綿紡績業が類型1に属する紡績業と結びついた結果、類型2に近い形になったものである。ここで類型2との違いは、この当時までに大型化した紡績工場の必要最小規模や日韓系朝鮮棉花による流通統制のため、類型2のように在朝鮮日本資本の手ではなく、日本から進出した大紡績資本が前工程を統合する形で進められたところにある。

2. 人絹紡績の発達と日本からの人絹紡績の進出

朝鮮の旺盛な需要に支えられた人絹紡績は、朝鮮で分業工程を発達させ、さらに人絹紡績企業の進出を促した。人絹紡績業は重要な輸出品として成長すると共に、朝鮮での分業を発達させ、さらに朝鮮で生産を完結させる方向に進んだ。こうした人絹紡績業の発達には、日本の重工業化にともなう軽工業の植民地進出という、全体的な展開の中で定められた。人絹紡績業が綿業と異なり全面的展開を示したことは、日本の繊維産業の状況が十分に反映していた。綿の場合には日本で定められた統制が實質的に朝鮮にも及んでいったのに対して、人絹では日本での過当競争の影響を受けて紡績から紡績仕上げまでの工程が朝鮮で整えられていった。

3. 朝鮮市場向けの移入品代替生産の発達—ビール醸造業

綿織産業が日本での競争を反映して、朝鮮での生産工程の一貫化をある程度進めたのに対して、日本で寡占状態にあったビール工業では、日本製の半製品から最終製品のみ作る製造に変化は見られなかった。

4. 日本の輸出品製造中小企業の朝鮮進出

日本の中小企業による輸出品であった琉球鉄製製造業や電球製造業は、日本での輸出統制を逃れるために1930年代半ば頃に朝鮮に大量に進出した。最後の製造工程のみ朝鮮におかれたこれらの産業では、植民地労働力の取寄というこの時期の日本からの工業進出の特徴が如実に現れている。

第5節 民族資本工業による朝鮮人向商品の生産—類型4

民族工業の代表事例としてゴム靴工業を取り上げた。朝鮮人向けの限られた市場を主たる対象とし、賃労働工場制という独特の生産手段の共有によって日本の商工業者との競争をしのいでいた。ゴム靴工業は日本商品との競争のため他のゴム製品分野へ展開することがなかった。朝鮮人向けの特定商品の生産という限られた分野で成功しても、それを契機として関連工業の発達などを呼び起こすことはなかった。

第6節 朝鮮の工業化と植民地工業教育の偏向

京城高等工業学校の学科は、京城高等工業学校は、軽工業技術者を養成する紡織科・応用化学科、植民地の技術官僚を養成する土木科・建築科、資源収奪の現場を指導する技術者を養成する鉱山科と異なる性格をもった学科からなっていた。紡織科・応用化学科は、朝鮮における自給的な産業発達、その発達方向が植民地統治の中で定められたとしても、これに即したものであった。だからこそ、朝鮮人卒業生が一定の比率を占め、地方の産業指導者、教育者など、人材養成という役割を果たした。一方、日本人卒業生の多くは、朝鮮より産業の発達した日本で企業活動に従事した。また、カリキュラム分析の中で示した授業科目の内容水準が高くなる傾向には、朝鮮での軽工業の発達が反映したと考えられる。

一方、土木・建築・鉱山、機械・電気、鉱山機械・冶金などの諸学科は、植民地統治方針の変化に応じて設置された。植民地行政と植民地に進出する資本のための基礎整備や、戦時体制下での兵站基地化という、外的要因に応じて設置されたものであった。一貫した工業教育方針の欠落の反映であり、ここに工業教育の植民地的形跡を見ることができ、戦時体制に入る1938年までの京城高等工業学校は朝鮮工學、電氣工學の学科を欠いており、このため植民地開墾での基礎工業育成に必要な人材・技術は、ほぼ全面的に日本に依存していた。機械工學と電氣工學を欠いた状況では、朝鮮で独自の技術体系を構築することはできなかった。

中等教育機関としては、京城工業学校が実質的に唯一のものであり、工業補習学校によって不足が補われようとした。しかし、これらだけで朝鮮に必要な技術工を養成することはできず、在朝鮮日本人工業家による工業教育の拡充要望も取り上げられなかった。

小括 1930年代の工業化の植民地型における技術的特徴

第1節で見たように、1930年代の資源収奪型工業は決して停滞的なものではなかった。

金増産のための機械設備の導入、日本に先んじた浮遊選鉱法と組み合わせられた育化製錬の普及、兼二副産物の製銅圧延工場の操業再開に見られるように、新しい生産技術さえ導入された。しかし、これらすべて朝鮮の資源への要求の度合いが変化したことによるものであって、資源収奪型工業における技術の発達段階が宗主国の資源に対する要求水準によって規定される特徴は変化は見られなかった。この資源収奪型工業を類型1とする。

資源収奪の量的な拡大は、朝鮮の工業のあり方に変化を要求した。しかし、領南製鋼所のように日本での生産の体制と強く結びつけられたところでは、技術発達を見ることができない。この変化は、第2節で述べたように總督府と結びついた在朝鮮日本資本の手で定められた類型2として現われた。

この時期に登場した類型3は、植民地の安価な労働力の収奪を主目的としたものであり、生産設備、原材料は基本的に日本に依存していたため、日本での競争を反映して定められた人絹紡績における分業の発達、紡績の綿紡績を例

外として、各工業は個別に日本に結びつけられていた。このように類型3に分類した工業も、その発達は宗主国の工業の状況に規定されていた。この点では類型4も宗主国との関係で発達を制約された植民地的工業の枠組を越えるものではなかった。

これに対して類型1の量的な拡大から派生した類型2は、これらは解放後に所有関係が代った際には、製品の最終加工または原料を国外に依存する資源収奪型工業と異なり、新しい民族工業の基盤ともなりえるものであった。總督府の政策に沿って定められた植民地の活動の多様性は、この類型に属すると見ることが出来る。

第4章 朝鮮における日露の活動と總督府の産業政策

第1節 日露の朝鮮進出と總督府の電力計画

1925年から実施された「産米増産更新計画」は、14年間で3000万円以上の費用を無機肥料の購入に充てるとされていた。同計画は外米輸入の抑制を目標としていたので、計画の主旨からして無機肥料を輸入に依存するわけにはいかなかった。また計画を推進した原爆能産下閣議は、この計画を基礎として工業を誘致する意思を示していた。この当時の日本で空中産業園定法による礎安を製造していたのはカザレー法による日本産炭とクロード法による第一塩素工業だけであった。水力開発を基礎とした電解水素をアンモニア源にするとしたならば、朝鮮總督府の「産米増産更新計画」を支えられるのは技術的に日本産炭だけであった。このように朝鮮總督府が日露を誘致する積極的な理由を明らかにしたことは、従来の野口運と森田一雄、久保田豊の個人的関係、および日本国内での事業拡張の余地がないことから行われたとする日露の朝鮮進出問題に新しい視点を示すものである。

第2節 朝鮮による露アルカリ工業の形成

1. 朝鮮進出前の日露の技術体系

カザレー法導入以前からの日露の技術の発達を遡ることにより、延岡、水俣の同工場を中心として朝鮮進出と重なる1920年代終わりころまでに、日露は化学工業の基盤を確立した。

2. 朝鮮における日露の技術の展開

異端で操業を開始した当初の朝鮮は、アンモニア合成法には延岡、水俣での経験を活用したものの、硫酸の製法は実質的に全面転換された。これは硫酸資源の乏しい朝鮮の状況に対応するものであり、この製法が軌道に乗るまでは、硫酸の製造能力が朝鮮の生産能力を規定していた。一方、朝鮮は操業当初から日本では経験のない分野に進出している。それは、朝鮮總督府燃料運給研究所と共同で行われた湿式法によるアルミナの製造研究、燃料運給研究所の研究を引き継いだ石灰低温乾留工業、總督府の統制により優先的に原料備蓄を確保することができた油質工業などの分野であり、いずれも朝鮮總督府によって下支えされたものであった。

アルミナの製造研究では、火焼明礬石から鉄分を除去する方法として酸化アンモニア、硫化水素、亜硫酸ガスなどによる還元法が試みられた。アルミナを苛性ソーダで溶解して不純物を濾過する方法を採ることができなかった理由は、朝鮮で苛性ソーダの供給がなされないことに求められる。この他にも先に示した新分野では、石灰乾留工業における酸性油の処理や、備蓄から火柴原料のグリセリンを抽出した後の脂肪油の処理において、苛性ソーダを欠くために生産技術を確立することができなかった。これは日露が延岡、水俣で多角化を進めたのに対して、実質的に礎安専業工場であった朝鮮の技術基盤の脆弱性を現わすものであ

った。

3. 本宮工場時代

1935年に竣工された本宮工場は長津江の水力を消化するために作られたものであるが、興南工場が実質的に硫安専業であったのに対して、本宮工場では多様な化学工業を展開する基礎を確立した。1937年1月から本宮で製造が開始された水酸化苛性ソーダによって朝霞は化学工業を展開するための際アルカリ工業の技術基礎を確立した。

特にここで水銀法を選択したことには注ぎたい。水銀法は隔膜法、アンモニア法と比較すると一番高価になる。水銀法を他の2法と比べると隔膜法では食塩が2~3%消費し、アンモニア法では食塩からの収率が75%程度にしか過ぎないという欠点がある。この当時水銀法による苛性ソーダが日量とされていた分野は、人絹製造にはほぼ限られていた。日量も延岡でベンベルグ繊維の製造原料として水銀法による苛性ソーダを生産していた。しかし、朝霞は人絹製造に参入せず、朝鮮の人絹繊維の製造を行ったのは、織紡、大日輪であった。朝鮮總督府では織紡の増産を行うにあたって生産に必要な苛性ソーダの供給を約束しており、このことから朝霞の水銀法の選択に際して總督府の意向が強く働いたと見る事ができる。

塩安の製造、カーバイドからの石灰窒素の製造など、本宮で行われた肥料関連分野の展開は、先に示した朝鮮での硫黄資源の不足による硫安製造能力の限界を克服する試みであった。しかし、水俣でカーバイドを出発物質としてアセチレン、アセトアルデヒド、酢酸、アセトン等を製造するなどカーバイド化学工業を全面的に展開していたのに対して、本宮ではアセチレンから低品質のカーボンブラックを製造する程度であった。実質的に肥料専業であった興南工場を中心とした時期と比べると、化学工業の基礎が確立し製品も多様化したものの、水俣での急速な展開と比べるとその発達は抑制された。

この時期には石灰低濃硫酸から生まれたタールなどを原料として電極製造にも進出した。本宮における生産技術は、電極の製造を含めて各種電気が多用するところの一つの特徴が見れるが、カーバイド中や電気分解に必要な電極の自給も図られた。これは社内用電極の自給に止まらず、朝霞は電極製造業者として大規模なものに成長した。

4. 火薬工場

延岡の日産火薬が企業買収を通じてダイナマイト関連材料の内製化を誓ったのは、1940年のことであった。しかし、朝霞火薬は竣工当時から基本的な原材料を内製化する方針であった。これは原材料市場が十分に発達していない朝鮮では、購入原料に依存することができないために内製化を進めざるを得なかったためである。そして内製化の進捗は朝霞の発展にもかわらず、朝鮮において関連産業が発達する可能性を開き出したものであった。朝霞の生産を支えた同社の工作工場の機械設備は、朝鮮で1、2を争うほどのものであった。1930年代の始めからここでは社内鉱山で使用する鉱石採掘の製造が入れ行われていた。しかし、これは朝鮮の鉱業開発の発達と無関係に行われたものであって、1930年代末に発達した朝鮮の鉱山機械製造業と関連をもつことができなかった。このように朝霞の高い技術はかえって内製化を進めさせることになり、朝鮮の他の産業分野との関連を持たないものになっていった。

小松 朝鮮道産の際アルカリ工業の確立と朝鮮總督府

朝鮮の豊富な電力資源を利用して硫安製造を進めようという当初の朝霞の活動は、類型1に分けられることができる。一方、抽脂工業、石灰低濃硫酸、アルミナ製造という總督府の誘導にしたがって朝霞が進出した新分野は朝鮮の資源

を朝鮮で製品化する動きとして類型2に分類されよう。このように、朝霞の活動はその実態から二面性をもったものといえる。これらの新分野での生産を起動力に乗せた苛性ソーダ製造は、人絹紡織業の基礎を形成するという点で、一部で朝鮮の工業の展開を形成していった。

第5章 1930年代後期以降の工業の発展型の度重

第1節 戦時体制下における朝鮮の「重工業化」の態形

戦時体制下において朝鮮の工業生産額は第2期に引き続いて急激に増大していった。特に戦時期の朝鮮の工業は、鉄鋼業の伸び、軽金属生産とそれを支えた高電圧送電などの個別事例を通して「重工業化」の推進とみなされている。植民地朝鮮の工業と宗主国日本の工業との相互関係は、宗主国日本の大陸進取政策が戦時特色を強めるに従って、その影響を強く受け、植民地朝鮮の工業形態も大きく変化していった。1930年代中期までに形成された工業生産の類型も、こうした全体の枠組みの变化において新たな展開をむかえることになる。この枠組は、「臨時資源調査法」が民間生産を圧迫しながら軍需生産へと工業資源を動員する中で強化されていった。本章では、第2期に発達した工業分野とその類型の関連に注ぎながら、戦時体制下の植民地工業の展開を類型的に分析することによって戦時期の工業の実態を解明する。

第2節 戦時期の資源収奪の強化-類型1の拡大

1. 鉄鋼業の展開

日中戦争の拡大に伴う鉄鋼需要の増大、これをまかなう原料鉄鉱の供給手段として日本が採用したのは「わが国の勢力圏内にある外地製鉄原料賦存地に大製鉄所を建設し、もって鉄鉱の緊急増産を図る」ことであった。日鉄の拡充計画に併せて、朝鮮では茂山の鉄山開発が進められた。茂山の鉄鉱石を原料に換装する日鉄朝鮮製鉄所(1942年操業開始)は、設立にあたっての朝鮮總督府や朝鮮軍の要請にもかかわらず製鋼正産設備を密に計画し、実際には八幡内製の製鉄生産に集中した。八幡の生産力増強のために、戦時下の悪条件でも南浦製鉄所の建設工事は急進に進められた。これに先立って建設された三菱製鉄南浦製鉄所(1939年操業開始)でも、製品のループは主として日本の製鋼原料として供給された。1943年から電気炉が操業を開始したが、正産設備がない状態で日本向けの原料供給という性格を顕することはできなかった。

戦争の後期に入ると、重工業に転じた織紡や、日本開墾などの製鉄業者が朝鮮での製鉄業に動員された。これらは、朝鮮大同製鋼の鉱山用鋼材の生産を例外としていずれも日本向けの製鉄。原料生産を目的にしていた。特に電気製鉄などの新技術による製鉄炉や小型治金炉は、朝鮮に産する無煙炭を還元剤として採用することに特徴があった。しかし、炉の建造に必要な耐熱煉瓦製造業の基礎が脆弱な朝鮮では、炉型選定などのため操業法を確立することもできなかった。

このように戦時体制の中で朝鮮の鉄鋼資源を日本向けの製鉄に傾斜することを目的とした製鉄業-資源収奪型工業-は、拡大強化されていった。製鉄のための新技術が投入されることはあっても、朝鮮の製鉄業の構造的欠陥-植民地的特徴-であった正産設備の不足を解消する試みは、終戦直前までほとんど試みられなかった。

2. 220kV送電技術と軽金属製錬

植民地期の朝鮮で実証された220kV送電は、画期的技術とされる。しかし、盧川江系統では後に110kV適用の設備が追加され、また水電系統でも運転開始直後に高圧送電を支える機能的な設備である変圧器がリブレースされたことから

確保できるように、実験的段階にあるものがそのまま実施されたものであった。これには「満州国」での220kV電力系統整備のための実験としての性格が非常に強いものだった。それを端的に現わすのが東區に分割された220kV送電系統であり、朝鮮では系統運用の利益を十分に享受することはできなかった。このような実験的段階の技術を実地に投入することは、恒常的に電力が余っていた朝鮮で初めて可能なものであった。

この220kV送電線を経由して確保された朝鮮北部の水力は、軍需物資である軽金属、アルミニウム、マグネシウムの精錬に大量に投入された。しかし、戦争当前から直接還元法の調査研究を行っていた朝暹系日本金属マグネシウムを例外として、アルミニウム、マグネシウムとも化学工程が未立のままで生産が進められようとした。このため十分な生産実績を上げることができず、朝鮮では豊富な電力を利用して日本、「満州」で生産されたアルミナの電解が積極的に進められる程度であった。朝鮮の軽金属精錬業には、ジュラルミン合金の製造工程すらなく、もとより圧延工程もなかった。このため朝鮮の軽金属精錬業は日本に対する原料供給以外の機能を果たすことができなかった。

このような電気化学工業の展開にもかかわらず、その主要な生産手段となるべき電極工業も朝鮮では未発達に終わった。社内自給を目的とした日本高周波系の日本炭素工業や朝暹は一定の成果を収めたが、他は日本産の電極に依存して採掘していた。戦況の急迫の中で日本の電極工業の朝鮮移転がはかられたが、朝鮮産の天然黒鉛や無煙炭などの人造黒鉛代替原料の開発も滞ったままだった。

このように、戦時体制の中で、高度技術が投入されたとされる分野であっても、その実態は日本に対する原料供給に終結していた。こうした高度技術の投入も、戦時期における資源収奪型工業の一つの展開にしか過ぎなかった。

第3節 在朝鮮日本資本の戦時動員一類型2の展開

一方、類型2の在朝鮮日本資本による工業は戦時体制下で新たな展開を見せた。特に宗主国資本によって買収されていた朝鮮製鋼系朝鮮電鋸の設立が典型で、朝鮮で採鉱から煉鋼までの一貫生産が始められた。また、産金奨励策に伴う機械潤滑の増大を支える鉱山機械製造業が確立したように類型1からの派生も見られた。ただし、どちらの場合も日本の工業が戦時動員されて生じた空白を埋めるために実施されたものであり、戦時下の日本の工業の軍需動員としては、足りえなかったものである。朝鮮の戦時生産を支えるための工業という性格は、日本高周波の場合により顕著に現われた。元来特殊潤滑メーカーであった日本高周波は、朝鮮の他の鉄鋼業が日本向けの製鋼用材料生産に追われていたのに対して実質的に朝鮮最大の圧延業者として、民生用鋼材生産も一部で行った。こうした在朝鮮日本資本が戦時体制下で、朝鮮の戦時工業を支える生産活動を行ったその基礎は、1930年代半ばまでに形成されたものであった。

第4節 戦時下での民生生産の圧迫一類型3の縮小

このように重工業部門が、戦時体制下で量的に拡大していったのに対して、類型3のような民生生産は圧迫された。戦時体制に入ってから朝鮮で煉鋼を開始した人絹紡績業者は、戦時下の人絹糸の供給統制をめぐって、従来から朝鮮で煉鋼した紡績業者と対立、朝鮮の人絹業の基礎を築いた中小紡績業者は徐々に廃業に追いこまれた。戦時体制下で生き延びた民生品生産は大資本を利するものであった。同様にして、類型4とした民生品を生産する朝鮮人による中小工業も戦時体制下では日本に依存していた原料が入手できなくなることで消滅していった。

第5節 「朝鮮自戦体制」の構築一類型5の形成

戦時体制下の朝鮮の工業の特徴の一つに、わずかとはいえ兵器生産が朝鮮で進められたことがあげられる。その一つ、三菱重機の戦車製造計画は製鋼用原鉄製造の段階で失敗におわったが、朝鮮の鉄鋼業の欠陥であった圧延設備を朝鮮に移設していった。また、戦車製造計画を支えるために陸軍仁川造兵廠が日本から工作機械工具メーカーを誘致することで、朝鮮の中で機械製作体系が作られ始めた。このように朝鮮に基盤となる工業を誘致した上で、その上に生産部門を作る形態は、戦時体制下で生まれた新しいタイプであり、これを類型5とした。ただし、朝鮮の鉄鉱資源の大半が日本向けに製鋼される状況下で、兵器生産に必要な資材さえ確保することができなかった。一方、朝暹が行ったイソオクタン生産は、戦争当入前に築かれた化学工業の技術基盤の上で、日産と煤山燃料廠の技術が移植されたものであった。朝暹の戦時生産は、1930年代半ばまでに形成され類型2の技術基盤の上で展開したものであった。

第6節 戦時下の工業教育と職工養成

なお、このような工業生産を支えるために、戦時体制下で急速に人材育成策が定められた。これは1930年代の工業教育の欠点を補うように機械、電気の開分野を中心として京城帝國大学や京城高等工業学校、これらから派生した京城鉱山専門学校などによって急速に拡大された。

このような技術者以上に不足していたのが熟練工であり、戦時体制下では熟練工養成も積極的に推進された。しかし、それまでに形成されていた人的基盤の弱さは余りにも深く、簡単に埋めることはできなかった。

小括 戦時期の「重工業化」の技術的限界とその後継

戦争の拡大により日本の工業資源の調達の道が狭まること、植民地に産出する資源の重要性が一層高まった。この結果、第1節で見たように、類型1の資源収奪型工業は拡大強化されていった。それは鉄鋼業と軽金属製錬の分野で特に顕著に現われた。

戦時体制下での朝鮮では、まず類型1の資源収奪型工業が拡大強化されることで、日本向け原料生産という朝鮮の工業の対日従属性が一層強められていった。これに対して、朝鮮の中で生産を確立しようという二つの動きがあった。一つは類型2の在朝鮮日本資本による朝鮮の原料から製品までの生産を一貫させようとするものであり、他の一つは類型5の「朝鮮自戦体制」下で兵器工業の基盤を確立しようというものであった。ただし、他の工業とのバランスを欠いたまま急速に進められた兵器工業は、十分な成果を収めることはできなかった。この間、民生生産を目的とする類型3と類型4は、大資本の不利益を最小限に止めながら縮小していった。

第6章 結論

第2章から第5章までで明らかにしたように、植民地期の朝鮮の工業の発達は、その生産と資本の展開に着目して分析すると、本格的に工業化が進展する1930年代から40年代にかけて5つの類型に分類できる。

類型1は、植民地の資源を宗主国の工業が要求する水準にまで加工して移出する資源収奪型工業である。鉄鉱生産を中心とする鉄鋼業、粗鋼生産にとどまる乾式製鋼業、機械工程にとどまる煉鋼などにその典型例を見ることができ、類型1に属する工業の技術発達水準は、宗主国の工業の要求水準によって定まる。量的な拡大など宗主国の要求の変化により、第2期の構築に見られた資源収奪型工業の中にも技術発達が現れる。一方、佐賀型と強く結びつけられた朝南浦製鋼所のように、その操業形態が硬直化した植

合には技術発達に要求に対応できず、朝鮮で新たな工業の形態を派生させた。

こうして、1930年代に入って類型1から派生したのが、類型2とした在朝鮮日本資本の工業であった。資源から製品までを植民地で一貫して生産しようとする動きは、資源取寄型工業を進める宗主国資本と対立し、その発達は宗主国内部の資本の間の関係に左右された、この部門の大々的な発展は、30年代後半期以降、戦時動員が急速に進められる中で植民地経営の全体的体制が変化してからのことである。

一方、1930年代に入って発達した類型3は、宗主国からの原材料に依存して植民地で製品生産を進めるものであり、植民地の労働力を主な取寄の対象とする点で新しい特徴をもつ。類型3は移入品代替生産や輸出品製造業の朝鮮進出として進められた。採集に必要な原材料や生産資材の供給は日本に依存しており、類型3の工業の発達は朝鮮の工業の日本への従属を進めるといふ植民地工業としての特徴をもっていた。

類型4は中小規模の民族工業であり、外的な形態は類型3とほぼ同じものだった。在朝鮮日本人との競争の中で活動する民族工業は、限られた市場を対象とする生産を行うだけであり、これを基盤として他の分野に生産活動を拡げる動きはほとんどなかった。

戦時期に兵器生産を目的として日本から進出した工業は、高度な技術を要する兵器生産を支えることを目的として、植民地に工業基盤を形成しようとした点でこれまでの類型とは別のタイプに属すると考えられる。そのために、これを類型5とした。ここでは工業基盤の形成も一つの目的におかれていたが、資源取寄型工業の急激な拡大と並行して進められたため、時には採集に必要な原材料も確保できなかった。これは形勢的な工業発展という植民地工業のもつ根本的構造に由来するものであった。

類型2は類型1の一部から派生したが、類型1や類型3の発達は宗主国の工業との関係で規定されていた。朝鮮の苛性ソーダ生産と人絹紡織業、織物による朝鮮の棉花から綿布までの一貫生産のように例外的に朝鮮で生産の連鎖が形成されることもあった。しかし、朝鮮の工業の主要な領域を占めた類型1、類型3は、朝鮮の中で積極的に生産の連鎖を形成しようとしなかった。こうしてみると、類型1、類型3と異なる性格を持つ類型2を他の類型と并列することで植民地における工業発達の特徴を明確にすることができることが分る。

問題設定で触れたように、先行研究では工業生産の実態分析なしの体系的性格規定が見られた。その一つに軍需工業論があった。この軍需工業の実態を分析すると、戦時期の軍需生産はそのほとんどが類型1の資源取寄型工業として進められたものであることが分る。類型1が、戦時期には軍事性をより強めながら取寄が拡大強化されていったのである。したがって、軍需工業的側面は、主に資源取寄型工業の、特殊な政治的経済的体制下で見せた形態として捉えることができる。

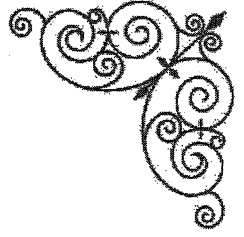
これらのことをふまえて植民地期の朝鮮の工業を概括すると次のように整理できる。日本による取寄的構造の中で進められた朝鮮の工業の発展構造を見ると、その主軸は常に資源取寄型工業に置かれ、日本への原材料供給を目的とし、その目的に沿う限りで機械制生産が進められた。一方、1930年代の軽工業の勃興の多くは、重用産業減荷法による統制地域外への進出、または日本の工業の重工業化への転換に伴う軽工業の海外進出という性格をもっていた。ただし、両者の間に位置するものとして統制地域の産業政策に

よる形で朝鮮で活動した企業—その代表として朝鮮があり、また殖産系の企業群も加えられる—これらによる活動が、一部では日本の資本と対立しながらも植民地で生産を完結させる方向に進んだ。ただし、これは植民地に成立した産業資本と宗主国資本の対立であり、その活動の目的は共に植民地人民からの取寄にあった。そして、朝鮮などの工場内で生産のほとんどが完結する形態は、朝鮮の他の工業分野の発達に直接寄与するものでもなかった。

従来の経済史的な立場から、民族資本と日本の宗主国資本の対立を論じたときに、それぞれの持つ技術の格差の大きさのため、両者の交流の有無が問題とされた。しかし、鉱山業や繊維神油業に見るように、朝鮮の資源を利用して朝鮮で開発が行われる場合には、不利な条件の中でも朝鮮人の経営が日本人に伍すまでに成長することもあった。ここで、朝鮮人との競争となったのは多くは在朝鮮日本人であった。本論文では民族資本による小規模生産の技術にほとんど勝たむことができなかったが、これまでに示したように、植民地に基盤をおきながら宗主国資本と並ぶ地位にまで発達したのは、殖産系の朝鮮製糖、日本高岡波、朝鮮産綿油を原料とする油煎工業などであった。こうしてみると、類型1と類型3の宗主国資本による植民地工業、類型2の在朝鮮日本資本による工業、類型4の民族工業という三重構造を構築することができる。二重構造論に見られた宗主国資本による植民地工業と民族工業の間の隔絶は、在朝鮮日本資本の工業が進めるのである。宗主国資本による植民地工業と在朝鮮日本資本の工業の対立関係、在朝鮮日本資本と民族工業の対立関係、この両者を分析することで初めて植民地期の朝鮮の工業の全体像を把握することができる。

本論文では取寄型を主軸とした植民地期の朝鮮の工業の中に、朝鮮總督府の産業政策を具現した朝鮮資本の活動を具体的に解明することを通して、宗主国資本の活動のみでは一般的な説明ができない植民地において原料から製品までの生産を一貫化させようという動きに着目して在朝鮮日本資本による工業活動の特徴を解明した。

このように、植民地での取寄のための物質的基礎として工業開発が進められたのであり、その発達の方向は日本経済の展開に即して決定された。日本の工業に従属する形で進められた朝鮮の工業は、朝鮮における再生産のための物質的基礎とはならなかった。そして、解放後の分析により直接の継承となることはなく、朝鮮戦争により工業設備の多くは破壊に陥った。しかし、本論文で植民地工業として規定した類型1や類型3の場合には、解放による所有関係の変化があっても、日本もしくは他国の工業に対する従属性を直ちに脱しえるものではなかったが、朝鮮や殖産系の日本高岡波、朝鮮製糖、また綿業や人絹紡織業は、所有関係の変更に伴って朝鮮で民族工業の基盤として発達する可能性をもっていた。このように帝國主義支配の物質的基礎としての技術の生産過程内における連鎖の相違に着目することは、有効な視点であった。



修士論文梗概

終戦直後の日本における大学改革の歴史的分析 —東京工業大学の場合—

経営工学専攻 岡田大士(97M42065)
指導教官: 梶 雅範、木本忠昭

Synopsis

This dissertation has analyzed the process of the so-called "Wada Reform", the Postwar University Reform at the Tokyo Institute of Technology, named after the then president, Koroku Wada in the immediate aftermath of World War II. The analysis was based on manuscript records of the Reform Committee which have never been examined previously. The author took interviews from surviving professors who were members of the Committee.

The reform process, from September 1945, up to January 31, 1946 when the Reform Manifesto was adopted, can be divided the following four periods.

- I. The Reform Committee headed by the president Wada discussed a reforming ideal. They decided to concentrate on the abolition of narrow-minded and overspecialized departments in the first stage of the university reform.
- II. The Committee tried hard and with various means to persuade unwilling members into abolishing departments.
- III. At the end of period, the university finally decided in the plenary faculty meeting to abolish departments.
- IV. The committee discussed some details of reform. And the Reform Manifesto was adopted officially in the plenary faculty meeting at the end of this period.

The reform committee consisted of ten members, including President Wada and two Secretaries General. They represented liberal professors and young radical associate professors, and reformed university very swiftly. They employed the enthusiastic support of reform-minded junior faculty members and passive recognition of politically indifferent, narrow-specialty-conscious faculty who were at a loss after the war.

序論

1 先行研究と問題設定

東京工業大学(以下東工大)は終戦直後、他大学に先駆け抜本的な大学改革に着手した。その改革は、当時の学長和田小六の名を取って「和田改革」と呼ばれている。和田改革に関する従来の研究では、和田個人の先見的教育的業績として評価されるか、一般教養科目導入の先駆けとして評価されてきた。しかし旧来の研究や東工大の沿革史『東京工業大学百年史(以下百年史)』では、議論の詳細な経過と、改革の担い手となった集団に関する分析はなされていない。改革案を作成した「刷新委員会」の議事録メモが東工大百年記念館に残されており、本研究ではこの議事録メモと当時の教官へのインタビューを主に用いて、改革議論を開始した昭和20(1945)年9月28日から、改革案である『東京工業大学刷新要綱』(以下刷新要綱)が承認される昭和21(1946)年1月31日までを対象に、議論の経過と改革の担い手となった集団を明らかにし、和田改革の過程を再構成した。

2 史料について

2-1 『東京工業大学百年史』(1985年、東京工業大学)

本研究では、公式な沿革史である百年史の記述に沿いながら、刷新委員会の議論、当時の東工大の様子などを補うことで、和田改革に関する詳細な歴史記述を行う。

2-2 議事録メモ

百年史では触れられていない刷新委員会等の議論について、手書きの詳細な記録が残っていた。これは当時無機化学教室助教であった稲村耕雄が筆記したものと考えられる。本研究では、議事録メモのうち、刷新委員会が議論を開始する昭和20(1945)年10月から刷新要綱が承認される昭和21(1946)年1月までの刷新要綱成立に関わるものを解説し、その議論の流れを追った。

2-3 当時の教官へのインタビュー

当時の刷新委員会の議論の様子、学内の雰囲気などを知るため、昭和20(1945)年当時在職の教官で、今なお健在の方へインタビューを依頼した。最初に依頼したのは、刷新委員であった早川康弐氏、崎川範行氏の2名である。次に刷新委員会に以外の教官として、当時応用化学科助教であった畑敏雄氏へ、インタビューを依頼した。

2-4 その他

議事録メモと同時に、当時の学内文書や和田が書いたメモ、学内教員に関する人物評・人物伝・自叙伝、インタビュー、座談会記録可能な限り集め、刷新委員会のメンバーや周辺人物の人物を再現した。主要な人物の経歴照会にはパソコン通信が提供する人物データベースも用いた。当時の社会事情や学内事情を知るために、時代年表と東工大の学生新聞「工業大学新聞」を用いた。

第1章 改革前史: 和田学長の着任

1 和田小六の経歴

1-1 和田小六の家系・学歴

和田小六は、明治の元勳木戸孝允の養嗣子木戸孝正の次男として、明治23(1890)年8月5日に生まれた。兄は戦時中内大臣を務め、天皇の側近として有名な木戸幸一である。和田の母方の実家は山尾家であり、「工業教育の父」と呼ばれる山尾庸三は、母方の祖父に当たる。

学習院中等科を卒業した小六は第一高等学校を経て東京帝国大学造船学科に進学し、大正4年に卒業。同大学の大学院で航空学を専攻した。翌年には、東京帝大の航空学調査委員会委員となった。大正8(1919)年に曾祖父の家系を次いで「和田」姓を名乗るようになり、大正9(1920)年、文部省留学生として英、米、独、仏へ2年間の留学をする。さらに留学中の大正10(1921)年に東京帝大付属航空研究所研究所員となり、大正11(1922)年に帰国する。帰国した和田小六は様々な航空関係の政府委員を務める。翌年には東京帝大工学部の教授となり、昭和2(1927)年には博士号を取った。

このあと和田は航空研六代目所長となり、技術院の次長となるまでその任にあった。航研機の開発に関しては和田は総帥として全体統括に専念したという。

1-2 和田の技術院時代

和田は昭和17(1932)年技術院次長となった。技術院時代に和田が書いた「決戦下の科学技術」では、「研究機関と生産技術とが兎角遊離し勝ち」であり協力が十分でない指摘する。戦況が悪化していく中での、技術院次長という立場にふさわしい政治的な発言ともとれるが、研究の発展と生産現場との高度な連携という意味では現代でも十分適用する言葉である。

1-3 和田学長の誕生

和田が東工大学長に任命されたのは、戦時中の昭和19(1944)年12月16日である。学長着任当時の覚え書きのなかには『問題の検討』と題されたメモが残っている。内容を見ると、日本の大学における職業教育的性格を痛烈に批判し、ドイツのTechnische HochschuleやアメリカのMIT、CITなど、海外の工学教育を参考しているのがわかる。この覚え書きには、『昭和20年7月26日以前に書かれたものと思われる』という注釈があり、和田は、戦時中から、大学改革に向けた構想を練っていたと思われる。

2 戦時中の東工大

2-1 東工大の軍事動員

軍事研究について、これまでのインタビューによると、ほとんどの学内教員は何らかの形で「軍事研究を行っていた」という。しかし、一部には名目上「軍事研究」をしていることにして応召を逃れた場合もあったようだ。一方学生は、技術将校の研究補助員として動員されたという。だが実際には、多くの学生が軍需工場を初めとする各種の生産現場へ動員され、研究や実験とは全く無縁の生活を強いられていたことは、いうまでもない。

2-2 終戦を迎えて

「私は昭和20(1945)年の8月15日、終戦の御詔勅を東工大本館の中庭で、そこを埋めた大勢の教官や学生と頭を下げて放心したように聞いていた。これがあの愚かれたような興奮の終わりであった

のかというような気持ちがないでもなかったが、それから始まる戦後の混乱、士気の退廃、欠乏、そして再び芽を出す生きる意欲…」

上の文は、和田の没後学長となった内田俊一が、自身のエッセイで述べた終戦の日の様子である。畑氏のインタビューでもわかるのだが、軍事研究に強く関わっていた教職員たちはかなり熱中して研究に関わっていたようである。内田のいう「憑かれたような興奮の終わり」「志気の退廃」も十分理解できる。

第2章 和田改革における議論の流れ

1 教授助教授懇談会の開催（9月28日、10月5日）

終戦当初は教職員・学生共にかなり混乱していたようだが、和田は自らの手による改革に意欲を示したという。

百年史によると、9月28日の教授助教授懇談会では学内の教授・助教授・専任講師を集め、自由討議を行った。その結果「新学制委員会」が発足し、委員長として内田俊一が推薦されたという。しかし、これ以降百年史に新学制委員会は登場しない。

10月5日午後再び「教授助教授懇談会」が開催された。百年史によると、和田は白紙から東工大の新発足を期して、自主的改革により理想的な大学の建設に進捗すべきである旨を説き、教官の隔意無き意見を聴取したいと述べたという。その結果多数の教官が自己反省し、今後の方向について意見を開陳したため、議論は延々午後8時まで及んだという。その結果「新学制委員会」とは別に「教学刷新調査委員会（刷新委員会）」を設置し、刷新委員を選出した上で和田が自ら委員長となり、「之に刷新要綱の立案を委嘱」した。

2 東京工業大学刷新委員会

議事録メモに残されている「東京工業大学革新要綱」によると、「互選により7名の革新委員を決定した。学長、学生部長、事務官、及び革新委員により構成された委員会は…」とある。学長、学生部長、事務官という行政上の責任者以外は、選挙で7名を選んだのである。議事録メモと照合した結果、7名の名前が確認できた。以下に和田以外の刷新委員会構成員を紹介したい。

2-1 石井茂助（事務官、東京工業大学総務部長、当時48歳）

石井は昭和4(1929)年4月1日東工大の発足と同時に初代事務官に就任し、昭和23(1948)年に逝去するまで担当した。教育予算に明るく、その仕事ぶりは東工大の学生新聞「工業大学新聞」の「教育予算の権威」という言葉で十分説明がつく。

2-2 山田良之助（学生部長、金属工学科教授、当時48歳）

昭和17年の教職員一覧では、山田は学生主事、事務取扱を担当していたことが確認できる。百年史によると、昭和23(1948)年石井が死去したのち、半年間総務部長を務めていたという。刷新委員会では、山田は主に入試関係の改革に取り組んでいたようである。

2-3 内田俊一（化学工学科教授、当時50歳）

内田は大正9(1920)年に東京帝大工学部応用化学科を卒業したのち臨時皇室研究所技師を経て、昭和4(1929)年東工大助教授となる。着任してすぐに化学工学科の創設準備委員長を務め、昭和15(1940)年に発足した同学科の主任教授についた。この学科は東工大の大学昇格後初めて新設され、同時に化学工学の独立学科として国内最初の学科である。またこの学科は内田の留学先であったMITのカリキュラムに積極的に取り入れたという。和田小六の死後は学長候補者として教授総会で選出され、昭和27年8月から昭和33年8月までの6年間学長を務めた。

2-4 金丸競（応用化学科教授、当時45歳）

昭和20(1945)年当時同じ研究室の教授・助教授の関係にあった畑氏によると、ドイツ留学の経験のある金丸は「大正デモクラシーの性格」で、思想的にはリベラルでヒューマンリストだったという。

2-5 佐々木重雄（精密機械研究所 機械工学科教授、当時46歳）

佐々木は東工大の着任以前、東京帝大の航空研究所に嘱託として勤めていたことがある。佐々木が和田の依頼によって大学

基幹協会の幹事を担当していたことなどから考えて、佐々木と和田は教育・研究の両面で非常に強い協力関係にあったと考えられる。

2-6 矢木栄（化学工学科教授、当時41歳）

矢木は昭和7(1932)年専任講師として東工大に着任する。昭和11(1936)年に助教授に昇任すると、その年の9月にMITに留学。内田と共に化学工学科新設に大きく関わった。

2-7 稲村耕雄（無機化学教室助教授、当時37歳）

稲村は東京高等工業学校染料科を昭和5(1930)年に卒業、昇格直後の東京工業大学染料化学科へ入学、昭和8(1933)年に卒業している。いわば稲村は昇格前後の東工大で学生時代を過ごした唯一の刷新委員である。昭和13(1938)年より2年間日仏交換留学生としてコレージュ・フランス及びモンペリエ大学科学研究所で研究した。無機化学、錯塩化学、分光化学、色彩化学の研究で知られる。音楽や文学の才能も非常に高く、畑氏は稲村を「文学青年」と評した。戦後東工大に誕生した「技術史研究会」にも、田中実、神原周、崎川範行と共に参加していた。

2-8 崎川範行（燃料工学科助教授、当時36歳）

明治42(1909)年東京生まれ。昭和7(1932)年東京帝大工学部応用化学科を卒業したのち、昭和16(1931)年燃料工学科の新設に伴い、東工大助教授に就任した。幅広い趣味をもち文才もあつたようで、著書も専門分野の科学書の他、趣味のあるやきものや宝石を扱ったものが多数存在する。なお、崎川氏は89歳になった今も健在である。

2-9 早川康次（数学教室助教授、当時34歳）

早川は昭和7(1932)年東京帝大理学部物理学科を卒業後理化学研究所の木下正雄氏の仲介で東工大助手として採用された。留学生教育を目的とした予備部で、助教授として物理・力学を教えていたこともある。学生団体との関わりでは、戦時中に結成された奉誠会で、学生寮の面倒を見ていたという。また、奉誠会情報部が発行した文芸誌『工大文化』でも早川氏の名が副部長の肩書き付きで確認できる。早川氏は崎川氏と共に今なお健在である。

3 刷新委員会構成員の検討

では、刷新委員会構成員の特徴について考えてみよう。

第一に指摘できることは刷新委員の所属学科が圧倒的に化学系、応用化学系に偏っていることである。

第二に、稲村以外の教官は帝国大学の卒業生であった。崎川氏は、東大や京大では教授・助教授の上下関係が強すぎて「自分勝手な研究が」できない。そこで「先生とうまくいかない」「少し変わったことをやりたい」人が東工大に来たと語った。帝国大学出身の東工大の教官たちの大部分は、もともと意識の高い改革志向を持つグループであつたといえよう。稲村は昇格後の東工大出身の新しい世代の代表といえる。

第三点は世代についてである。教授層である内田、金丸、佐々木、矢木、山田は昭和20(1945)年当時それぞれ50、45、46、41、48歳である。彼らは大正デモクラシー下に人格を形成したりベラリストが中心であつたといえよう。早川、崎川、稲村はそれぞれ当時34歳、36歳、37歳のまさに若手の助教授であつた。

第四に指摘できるのは、刷新委員には海外経験者が多いということである。彼らはいわば当時の世界最先端の理学・工学教育の現場を目の当たりにしてきた人物だったのである。

第3章 刷新委員会での議論の過程

1 刷新要綱採決までの時代区分

百年史の記述や議事録メモの記述により、刷新要綱承認までの会議の日程が確認できた。刷新要綱承認までに、教授助教授懇談会を6回、刷新委員会を20回、学制改革委員会を5回、助教授会を2回、その他懇談会を6回開いていたことになる。

10月5日の教授助教授懇談会以降は、刷新委員会に刷新要綱の立案が委嘱される。百年史によると、刷新委員会の議論の結果、11月2日の第3回教授助教授懇談会に改革案の中間報告が提出された。議事録メモによると学学科制廃止の採決をとつたのが12月18日の教授助教授懇談会であつた。この二つを期間中の大きな節目とし、刷新要綱承認までの過程を学学科制廃止実現への道としてとらえて、次の4つに時代区分する。

2 刷新委員会での議論

第Ⅰ期：中間報告の検討（昭和20(1945)年10月5日～11月2日）

第一回刷新委員会の記録は残っていない。しかし第二回冒頭の記録から、稲村が議事録を作り、早川が改革案を用意したことがわかる。早川氏へのインタビューからも、和田は、若手助教を積極的に改革の要職に付けていたことがわかる。

第二回・第三回刷新委員会では、東工大の教育方針・目的について検討される。このとき内田が東工大での教育方針として掲げたキーワード「国民福祉の増進」と「文化の高揚」は刷新要綱に盛り込まれ、「国民福祉の増進」は学則に今も残されている。

第四回刷新委員会では、入学後に設定するコース制度に関する議論が急速にすすむ。和田はコースについて「現在の科をかりに標準として一般コースをつくってみるとよい」と発言している。和田は履修モデルとしての学科に関しては、反対というわけではないようだ。

第五回刷新委員会の最初の議題は入試制度である。入学制度については「高次理(系)以外のものにたいしてはまづ資格試験を受けさせる」ことを検討している。当時東工大では、旧制高等学校出身者は技術的・専門的な授業を求め、高等工業専門学校出身者は物理や数学が弱いまま高度な専門技術を求めているという。その様な高校と高専のギャップを埋めるのに、佐々木や早川は相当苦勞したと回想している。

また、和田はこの会議で学則の改正すなわち「現在の科の大別をなくすこと」「adm[管理運営]の方からgroup[学系]に分ける」ことについて先に決着を付け、細かい部分は専門委員会組織を設置して改革案を作らせるよう指示した。

第Ⅱ期：中間報告の浸透段階（11月2日～12月11日）

以上のように早川案と5回の刷新委員会、学生部会議を受けて、改革案としての中間報告は教授助教懇談会に提出された。一般教官達にとってこの改革案は非常に衝撃的であったようで、議論は粉砕した。一番多かったのは改革案を出すよりも「人事刷新してほしい」という意見である。教官達の発言から推察すると、「人事刷新」とは当時の大学で行なわれていたという、戦争責任の名の下に行われた教授追放を指していると思われる。

また刷新委員会の構成について意見する教官や、「この案は徹底的な案」と、さらなる改革を求めた教官もいた。おもしろいのは学生の質を問題にした意見である。どうも学生の手によってコースや研究室が選択されてしまい、研究室の質が低下するのを怖れていたようである。

さてこの会議を受けて刷新委員会はどう対応したのだろうか。第六回刷新委員会の議事を見る限り、人事刷新について、刷新委員会はあまり乗り気ではなかったようである。前述の通り軍事研究をしていたのは教授・助教授のほぼ全員であり、刷新委員会にしても「教授追放」と声高に叫べないのは当然である。和田はむしろ改革案による自己変革を期待している。「(教授助教懇談会)で意見を言はない人もいる」という佐々木に対し、和田は教官達へのアンケートを行うよう提案する。稲村は、アンケートに中間報告の注釈を入れることを提案する。

第七回刷新委員会の主なテーマは入学資格、研究協力部、学科廃止である。産業界との架け橋として構想される研究協力部の問題では、内田がMITの例を用いて詳細に話している。

学科制廃止についてはあまり進んでいない。アンケートの返答が少なすぎ、一般教官の考えがよくつかめていなかったためであろう。「敗戦の責任から科をはずすといふ理由はある」と戦争責任を理由にした学科解体を提案する金丸に対し、和田は「別の意見の全貌をつかんで協議する」「良く理解させてほしい」と、あくまで議論で決定したい様子だ。

第八回刷新委員会の議事録を見ると、終戦直後の物不足、食糧不足も刷新委員会の議題になっている。大学改革だけが刷新委員会の仕事では無いことがよくわかる。

中間発表から2週間すぎた11月17日と19日、刷新委員会は、刷新委員の出していない電気工学科と機械工学科に対して説明会

を開き、改革案の説明は佐々木が担当した。

電気工学科では、「修業年限四年ならばこれでよい」という発言がある。これは全学共通科目を1年次に押し込み、残り3年を従来通りに使いたいということであろう。機械工学科との懇談会でも同様の意見が出ている。また「理念案で急速に実施するのは困難」と不安がる教官もいるが、佐々木は「文部省はさんせいしている」として改革案支持を求めた。東工大の改革案は11月には文部省の知るところとなっていたのがわかる。

百年史によると、第九回刷新委員会の行われた11月20日は、改革案に対する意見を集めたアンケート報告書「第一回参考資料調査報告」が提出された日である。学科の存続を可とする教官の割合は52.6%と高い。学科存続を認めるのは、要するに「学科制が存続すると学内の刷新が不可能だ」という理由が考えられないという、極めて保守的な理由であった。

第十回刷新委員会でも、学生の生活問題・食糧問題がいちばんの問題であった。石井から提案された、食糧問題解決のための具体案は、かなり大規模かつ積極的な構想であった。やはり食糧不足は深刻な問題だったということであり、この様な窮乏の状態で改革を実現したということ是非常に意義深いものである。また、内田から「蒸留水・製氷、制作室等」の整備の要請があり、困難の中でも研究を続けていこうとする姿勢もうかがえる。

学科の廃止については、若干の進展があったようである。和田は若干不安げだが、佐々木は各学科の感触から自信を持ったようである。佐々木はまた、科をなくすための意見をまとめ、改革案の説明書を作った。佐々木が改革案を教官達に浸透させるために尽力した様子が、議事録メモから伺える。

第十一回刷新委員会では、学生の生活援助のために行う仕事に関して、具体的な提案がなされた。その一方で食糧問題について、前回の刷新委員会では石井が提案した内容に、金丸が不満を述べている。その内容は食糧問題対策が大がかりになりすぎて、大学の本分を忘れるのではと危惧した、金丸らしいきまじめな発言であった。

第十二回刷新委員会と第十三回刷新委員会は、12月11日の教授助教懇談会に向けての進行打合せが行なわれていたようである。早川は「[刷新委員会を]拡大したのもすなわち懇談会をそれまでの改革案に対する意見をまとめて返答する場を開催することを提案する。

第Ⅲ期：学科制廃止（1945（昭和20）年12月11日～12月18日）

改革案の浸透を図りさまざまな努力をしてきた結果、いよいよ学科制廃止への展望が開けてきた。そこで刷新委員会は一気に学科廃止の決議に持ち込もうとする。

第十四回刷新委員会は、学科廃止をどのように決定するかが議論されている。不安がる金丸や佐々木に対し、和田や内田、崎川らが再度確信を持たせようと努力する。崎川は「この程度でやらなければ他からやられる」と発言している。崎川のいう「他から」というのはおそらく政府やGHQなどのことを指すのであろう。この会議では決議方法も検討しており、早川は「今のとき絶対に反対の方はたつてくれといふほうがよい 根本的に本音からいって反対」と細部にわたっている。

もう一つここで取り上げておかなければならないのは、和田が「『研究所の問題』削除しておいてくれ」と依頼したことである。研究所は文部省だけでなく大蔵省との関連もあり、学部とは違う独自の問題が絡むので、学科廃止に研究所問題をだきあわせにしない方がよいと、和田は考えたのであろう。

このような刷新委員会だが、同じ日に行われた学科代表者との懇談会で、改革の困難さを思い知らされる。

一番多く反対意見を述べたのは、電気工学科教授山本勇だった。改革案には賛成のポーズを取りながら、慎重論を掲げて事実上反対する。その後和田や、崎川、矢木と、刷新委員達は改革の意義を訴えた。そして早川が改革の最重要点として（研究の振興）、（修学の自由）、（科制の廃止）を示したが、山本は感情的に反対した。

一方丁度この時期、助教懇談会が開かれた。

議事録メモによれば、金属工学科助教の桶谷繁雄が設立の経

過について、「キタンナイ懇談」を目指し、助教授と「助手その他の懇談会」として設置したと説明している。畑氏は「助教授間の横断組織」と評していたが、学科横断的な議論を行うために作られた全くインフォーマルなものと考えてのがよいだろう。実際に助教授会では、非常に活発な議論が行なわれている。ちなみにこの会議で学科の廃止について賛否を問うたところ、賛成29、条件付き賛成1、反対1という結果だった。

そして、第六回教授助教授懇談会が始まった。

最初に反対意見を出したのは、建築学科教授の田辺平学である。あまりにも急速で過半数の支持が得られないものには賛成できないという意見だった。続いて桶谷が助教授会の報告をし、「教助協の雰囲気では改革案が教授会で否決される感じもあった。」「学長にmoral supportを与へるためにひらいた」「大学だけ旧態維持では申しわけない 新しい大学を脱皮して作らなければならない」と改革の意義を唱えた。そして学科制廃止について「全助教[授]の総意とはいえないがこの案に全面的支持」を表明する。桶谷の発言を受けてか、燃料工学科助教授鶴岡が、拍車をかけて、採決を求めようとする。鶴岡の発言にあおられたであろうか、和田は一気に決議へもちこんだ。そこへ山本が「1(学科制廃止)につき賛成の人は起立してもらふ」、田辺が「学科別についてつづつあった方がよい」と割り込む。再度和田は「第1項(学科制廃止)につき反対の人は起立をねがふ」結局起立したのは田辺と電気工学科教授尾本義一、名前判断不能の1名の合計3名だった。

当時電気化学科教授だった杉野喜一郎は、和田について「はっきりいうとワンマン」と評している。確かにこの場面のみを見ると、そういえるかもしれない。だが、和田自身の改革への熱意と助教授層の強烈な後押しがあって、和田も普段以上に力が入ったのだといえよう。

この教授助教授懇談会の決議内容に付随して、新しく(改革案の要旨を討議の基礎とする)という項目が追加されている。今後刷新委員会は、反対派からの影響を受けないことを約束されたのである。

第IV期：細部の検討(昭和20(1945)年12月19日～1月31日)

この期間は、残る課題についての整理が行なわれる。特に重要なのは、「経営案」「講義」「評議会」の三点である。ここでいう「経営案」は学科廃止直後に設置された「経営工学コース」のことではなく、科学史、技術論、産業心理学などの「文化科学」的な科目を取り入れるための議論である。刷新委員会では、刷新要綱に準じた形での講義を2月4日から始めることを検討している。これが本当なら刷新要綱承認から一週間もしないうちに、授業が開始されたこととなる。「評議会」については研究所組織を「研究系」として独立させた点が特徴的である。

以上のような議論を経て、昭和21(1946)年1月31日の教授助教授懇談会において、「東京工業大学刷新要綱」は承認されたのである。

第4章 和田改革の評価

以上のような経過を経て、刷新要綱は承認された。刷新要綱が承認されるまでの中心課題は学科制廃止であり、一般教育科目の導入は刷新要綱承認後のことである。

刷新要綱成立までの議論を振り返ると、学長和田小六が終始改革をリードしていたのがわかる。若手助教授である稲村や早川、崎川は和田に活動の場を与えられ、改革案作成や議事運営にその若い力を遺憾なく発揮した。事務官石井と学生部長山田は役職者としての確かな判断で実務運営に当たった。着任間もない和田にとって航空研以来の旧知の仲である佐々木は和田と東工大の間のパイプ役を果たし、改革案浸透にきわめて重要な役割を果たした。ドイツ留学の経験を持ち、リベラリストでヒューマニストの金丸は、刷新委員会内の中でも常に公平な立場で意見した。MITで世界レベルの工学教育システムを見聞した内田と矢木が、東工大と工業界の連携のために提供したアイデア

も、50年以上たった現在でも通用する言葉で語られている。もう一つの改革の推進力として、助教授会の存在を挙げておなくてはならない。12月17日の助教授会で齋藤学科助教授の

川嶋千尋は、「自分の本当の意見を発表する」「自己を言ってもいい」と参加者に訴えた。たとえインフォーマルな集まりだったとしても、帝国大学出身者が多く「寄り合い所帯」の性格の強い東工大で、若手教官たちが学科の枠を離れ、横断的に話しあえる場が生まれたことは重要である。助教授会の存在は中心者の一人桶谷繁雄の言葉を借りるなら、和田にとってまさに“moral support”として大きな力になった。

反対に、改革を支持しなかった層とは、どんな集団であったのだろうか。議論の経過を振り返ると、明確に「改革案に反対」の姿勢をとる教官は少なかった。そんな中で特に目立って改革に抵抗したのは、電気工学科教授の山本勇であり、11月19日の機械工学科との懇談会で「理念案で急速に実施するのは困難」と、急速な改革に難色を示した機械工学科教授の海老原敬吉であった。二人に共通するのは高等工業時代以来の教官に当たる点である。佐々木に対するインタビューによると、当時「若い先生の中に『蔵前時代からの古い先生のやっていたことなっておらん』という改革の動きがあった」という。若手教官は高等工業時代からの教官に対し、何らかの不满を持っていたようである。明確に反対した教官は、戦前以来の体制に不满を持っておらず「なぜ改革する必要があるのか」と改革に批判的な立場に立っただけといえよう。

最後に改革推進でも反対でもないそれ以外の層について仮説を提示したい。多くは内田の回想に出てくるように、終戦で突然目標が失われ、茫然自失の状態であった。そのため将来の問題や改革に全く用意が無く、誰かが旗振りをする、簡単に動かされてしまふ人々であったのではないかと推察する。こうした無関心層は改革の妨げにならなかったという意味では、「改革を支えた層」といえる。

結論

以上のように、議事録メモを解読し、インタビューその他史料を用いて百年史の記述を再検討していくことにより、和田改革成立の過程をかなり詳細に再構成することができた。その議論の過程から刷新要綱が承認されるまでの中心課題は学科制廃止であり、一般教育科目の導入は刷新要綱承認後、つまり昭和21(1946)年2月1日以降の問題であったことがわかった。また改革の中心となった刷新委員会の構成を明らかにし、学内教官を改革を推進した集団の特徴を解明し、なぜかとも急速に改革を実行することができたか明らかにすることができた。すなわち、和田のイニシアティブのもとに、主として帝国大学出身のリベラルな教授グループとラジカルな助教授グループが結合して刷新委員会が形成された。彼らの主導のもとに、多数の助教授層の支持を得、旧守的な高等工業以来の一部の教官層の反対を排し、その周辺の無関心層を改革に引き入れることで、短期間に改革を押し進めることに成功したのである。

本論文で取り扱ったのは終戦直後から刷新要綱承認までの5ヶ月間の期間である。和田改革に関わっては刷新要綱が承認され、学科廃止が実施されたとき、学内でどのような変化が起きたか、刷新委員会以外の個別専門委員会ではどのような議論が起きたか。改革の影響を直接受けた当時の学生たちはこの改革をどう受け止めたかなど、まだ明らかにされていない部分が多い。これらを一つ一つ明らかにしていくことを今後の課題としたい。また改革に反対した層、無関心層に関するさらなる裏付けが必要である。今後さらに健在な教員に対するインタビューを続けていきたい。さらに「一般教養科目」に対して東京工業大学の改革の与えた影響の検討も今後の課題としたい。

『日本のエレクトロニクス企業における基礎研究の意義』 説間 直樹*

I. 研究の背景

日本では、1985年以来、企業における基礎研究が日本の全基礎研究費（企業、研究機関、大学の基礎研究費の合計）のうちの30%以上を占めている。米国と比較すると、いかに日本企業が基礎研究に貢献しているかがわかる。

しかしながら、昨今の不況によって、企業の社内研究開発費の売上高に占める割合が停滞していると同時に、基礎研究費の研究開発費に占める割合も停滞している。今日の景気停滞局面において、基礎研究にリスクマネーを投ずることは企業経営上容易なことではない。また、金儲けにつながりにくい基礎研究を企業活動において正当化することは難しい。そこで、私は、基礎研究の今後について危惧の念をもった。

II. 論証のステップ

本論文では、企業における基礎研究、すなわち社内基礎研究を存続させるべきかどうかを、以下の4つのステップを踏みながら吟味する。

1° 社内基礎研究を正当化するためには、「基礎研究」の定義がはっきりしていなければならない。しかし、米国 NSF や日本の総務庁などの主要機関による定義の妥当性を検討したところ、それらが、イノベーションのリニア・モデルに基づくトップ・ダウン定義であって、実態を反映していないことが分かった。

2° このように、従来の基礎研究の定義が実態を反映していないならば、どのような定義がよいのか？現場に近い研究マネジャーたちが基礎研究をどのように定義し、基礎研究にどのような効果を見出しているか、を参考にして、新しいボトム・アップな定義を決めるべきではないか？そのために日本を代表するエレクトロニクス企業（5社）の研究マネジャーたち（10名）に対し、基礎研究はどのような研究であるかを尋ねた。次に、基礎研究の効果を、国内外の先行研究、および上記研究マネジャーたちの指摘に基づいてリストアップした。その後で、それらの研究マネジャーたちから、各効果に該当する具体的事例を、インタビューおよびアンケートによって集めた。基礎研究の具体的事例は、合計で45例であった。

3° こうして、集められた基礎研究の具体的事例が、新しく定義した基礎研究の定義の範囲内に入っているかどうかを確認する。もし、基礎研究の具体的事例のすべて（45例）が新しい定義の範囲内に入っていれば、新しい定義は基礎研究の定義として、とりえず有効であることになる。

4° この新しく定義された基礎研究を、企業活動において正当化することは可能か？そうであるとすれば、どのくらい強く正当化できるか？特に、今日の不況下において、企業における基礎研究は存続させるべきかどうかを論ずる

III. 「基礎研究」の定義について

III-1 従来の「基礎研究」の定義

(1) 米国 NSF (National Science Foundation) による定義

NSF は戦後 40 年あまりにわたって、R&D 費用の性格別研究費のデータを採集してきたが、その分類 (basic research, applied research, development) が適切であるかどうかについては、いまだに解決を見ていない [Link 1996]。

1955 年以来実施された NSF のサーベイで用いられた「基礎研究」の定義は次のとおりである（筆者訳）：「商業的な目的を持たず、科学知識の発展のために貢献する独創的な研究。ただし、当該する会社の現在または将来の利益に貢献する可能性のある研究であってもよい。」

また、NSF の「応用研究」および「開発」の定義は、以下のとおりである（筆者訳）。

応用研究 —— 新しい科学知識の発見に直結して、かつ、製品や製造プロセスに関連する特定の商業目的を持った研究。
開発 —— 研究による発見やその他の一般的な科学知識を製品や製造プロセスに移転する際に生ずる、機械的な手順では対処

* 本稿は、1998 年度修士論文の概要である。

** 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。

できない諸問題の解決に関連した技術活動。

(2) 総務庁統計局『科学技術研究調査報告』における定義

- ・基礎研究 —— 特別な応用、用途を直接に考慮することなく、仮説や理論を形成するためもしくは現象や観察可能な事実に関して新しい知識を得るために行われる理論的または実験的研究をいう。
- ・応用研究 —— 基礎研究によって発見された知識を利用して、特定の目標を定めて実用化の可能性を確かめる研究および既に実用化されている方法に関して、新たな応用方法を探索する研究をいう。
- ・開発研究 —— 基礎研究、応用研究および実際の経験から得た知識の利用であり、新しい材料、装置、製品、システム、工程等の導入または既存のこれらのものの改良をねらいとする研究をいう。

(3) OECD 統計における定義

日本の総務庁の定義と似ているので割愛する。

III-2 主要機関の統計における「基礎研究」の定義は、実態を把握しているか？

ここでは、総務庁統計局の『科学技術研究調査報告』における「基礎研究」の定義について、その定義が基礎研究活動の実態を把握しているかどうかを吟味する。

[研究産業協会 1992] では、各企業が総務庁統計局の『科学技術研究調査』に報告する際の「基礎研究費」の算定の仕方が、7個の選択肢のどれであったかを、集計している（複数回答可、有効回答数 121 件）。最も多かった「基礎研究費」の算定方法は、4番目の選択肢：「総務庁の定義のとおりには『基礎研究』を分類できないので、全研究予算から、『基礎研究』の占める比率を推定し、概算して、回答した」というものであって、調査対象の全企業の 37.2%がこのような算定法を用いている。

この結果は、総務庁の統計における「基礎研究」の定義が研究活動の実態にそぐわないものであることを示している。

III-3 研究開発のリニア・モデルと「基礎研究」の定義の不適切さ

このように、総務庁の『科学技術研究調査』における「基礎研究」の定義が実態を反映していない原因は、『科学技術研究調査』が、研究開発のリニア・モデルが仮定されているからであると思われる。定義の文章を見れば分かるように、「応用研究」は「基礎研究」の成果を前提とし、「開発」は「基礎研究と応用研究」の成果を前提としている。すなわち、「基礎研究」→「応用研究」→「開発」という、知識移転のリニアなモデルが、トップダウン的に仮定されている。

そこで、研究開発の現場の実態を反映したボトムアップ的な「基礎研究」の定義を行う必要が出てくる。

IV. ボトム・アップ的な「基礎研究」の定義を導き出す手続き

IV-1. 基礎研究の定義・効能と具体的研究事例の収集

現場に近い研究マネジャーたちが基礎研究をどのように定義し、基礎研究にどのような効能を見出しているか、を参考にし、新しいボトム・アップな定義を決めるべきである。そのために、まず、日本を代表するエレクトロニクス企業（5社）の研究マネジャーたち（10名）に、基礎研究とはどのような研究だと思っているかを尋ねた。次に、基礎研究の効能を、国内外の先行研究、および上記10名の研究マネジャーの指摘に基づいてリストアップした。その後で、これらの研究マネジャーたちから、各効能に該当する具体的事例を、インタビューおよびアンケートによって集めた。基礎研究の具体的事例は、合計で45例であった。

- (1) 社外で行われている基礎研究をモニターするため ([平野 1992])。
- (2) 基本特許および他社の特許に対する対抗
- (3) 探索研究を速やかに行い、新しい技術シーズを提供し、技術移管を他社よりも早く行うことにより first-mover advantage を得ることができる ([平野 1992])。
- (4) 応用研究や開発において、発生した困難な問題を解決する（委託によるフィードバック）。
- (5) 基礎研究を行うことで、競争相手のイノベーションからのスピルオーバーを利用する際に、rapid second-mover とすることができる ([Cohen and Levinthal, 1989])。
- (6) また、事業範囲が広くなくても、科学技術知識のインプットが多様化しているのに対応して、幅広い基礎研究を行い多様な知識を融合する ([Cohen and Levinthal, 1989])。

- (7) 企業イメージの向上 ([平野 1992])
- (8) 研究者のリクルートに好影響を及ぼす ([平野 1992]).
研究者の志気の高揚 ([平野 1992]).
- (9) 基礎研究で用いる科学計測器(scientific instrumentation)の経済効果。(NMR, CT, 走査型電子顕微鏡) ([Rosenberg, 1994]).
- (10) 自社の事業に直接関わる応用研究や技術開発を、周辺からサポートできる ([研究産業会 1992],[矢作 1992]).

研究マネジャーたちに対するインタビューおよびアンケートの概要を次に示す。

以下の10名の研究マネジャーに対し、インタビューおよびアンケートを行った。

基礎研究所長 2名, 元基礎研究所長 3名, 元副社長 1名, 技術参与 1名, 研究部長 2名, 研究所企画担当 1名
インタビュー項目は次のとおりである。

「基礎研究の定義：どのような研究を基礎研究と呼ぶのか」

「研究開発のノン・リニア・モデルについて」

「基礎研究の役割・意義」

「既存の科学技術知識の組み合わせか、新しい科学技術知識の発見か」

「基礎研究と開発・生産のバランス」

「基礎研究のアウト・ソーシング、外部連携」

なお、追加アンケートにおいて、基礎研究の11個の各効能に該当する基礎研究の具体的事例を挙げてもらった。

IV-2. 「企業における基礎研究」の定義の導出

新しい基礎研究の定義は次のようにして決めた。一つは、研究マネジャー自身の基礎研究の定義を、もう一つは、研究マネジャーが基礎研究にどのような効能を見出しているか、の二つを参考にして決めた。

新しい基礎研究の定義は、次の「#1から#4のいずれかに該当する研究」である。

- #1 実用目的を意識することなく、学問的問題意識に基づいて、今まで理解されていない現象やシステムを理解したり、新しい物質やシステムを発見・発明する研究。すなわち、学問的研究。ただし、「学問」とは、自然科学と工学をさす。
- #2 学問的に最近芽生えてきた新しい研究で、企業の将来に役立つ可能性のある研究。
- #3 製品開発のシーズとなりそうなテーマに見当をつけて、そのテーマに取り組む研究。
- #4 製品開発からフィードバックされる形で依頼された研究で、製品開発上重要な現象を理解したり、製品開発上重要な物質やシステムを発見・発明したりする研究。

IV-3 「基礎研究」の新定義の妥当性のチェック

「基礎研究」の定義の各項目 #1から#4の論理和が、基礎研究の定義として妥当なことを確認した。

具体的には、インタビューおよびアンケートで得られた基礎研究のすべての事例(45例)が、上記の「基礎研究」の定義の各項目 #1から#4のどれかに該当することを示し、基礎研究の定義として妥当なことを確認した。

V. 基礎研究は企業活動において正当化できるか?

ここで、いよいよ、企業における基礎研究が企業活動の中で正当化できるかどうかの考察に進む。

まず、すぐ分かるように、IV-2節で挙げた「基礎研究」の定義項目のうち、#4の基礎研究は、企業活動において正当化できる。なぜなら、製品開発の部門から委託された研究であるからであり、社内での合意を取り付けやすいからである。

次に、定義項目のうち、#1, #2, #3について考えてみる。

もし、#3の基礎研究をやらなくなると、IV-1節で挙げた基礎研究の効能③(「探索研究を速やかに行ない、新しい技術シーズを提供し、技術移管を他社よりも早く行なうことにより first-mover advantage を得ることができる」)を初めとする多くの効能が消失する。それは、大きな損失である。したがって、#3の基礎研究は、無くすわけにはいかない。経営状態の許す範囲で実施すべきである。

また、基礎研究 #1と#2についても、基礎研究の効能⑦(企業イメージの向上)をはじめとする効能を大切に考えるならば、経営状態が許かぎり、実施すべきである。

以上を総合すると、「基礎研究」は、経営状態が許す限り実施すべきである、ということになる。

VI. 結語

VI- 1. 結語 1

従来の基礎研究の定義はトップ・ダウン的であった。それに対して、本論文では、新しくボトム・アップ的な基礎研究の定義をした。新しい基礎研究の定義は、次の「#1 から #4 のいずれかに該当する研究」である。

#1 実用目的を意識することなく、学問的問題意識に基づいて、今まで理解されていない現象やシステムを理解したり、新しい物質やシステムを発見・発明する研究。すなわち、学問的研究。ただし、「学問」とは、自然科学と工学をさす。

#2 学問的に最近芽生えてきた新しい研究で、企業の将来に役立つ可能性のある研究。

#3 製品開発のシーズとなりそうなテーマに見当をつけて、そのテーマに取り組む研究。

#4 製品開発からフィードバックされる形で依頼された研究で、製品開発上重要な現象を理解したり、製品開発上重要な物質やシステムを発見・発明したりする研究。

VI- 2. 結語 2

さらに、基礎研究の定義の項目 #1 から #4 の各々について、正当化を行なった。定義 #4 の研究は企業活動において正当化することができた。また、定義 #1, #2, #3 の研究についても、弱いながらも、正当化することができた。

以上を総合すると、経営状態の許す限り企業は、最低限の基礎研究の技量を実施し、その技量を保持しておくべきである。さもないと、基礎研究の持つ、せっかくの効能を失うという代償を払うことになる。

参考文献 (一部のみ)

- Cohen, W. M., and Levinthal, D. A. (1989), "Innovation and learning: the two faces of R&D," *The Economic Journal*, 99, 569-596.
- Freeman C. (1994), "The Economics of technical change," *Cambridge Journal of Economics* 18, 463-514.
- Kline, S. J. (1990), *Innovation Styles in Japan and the United States — cultural basis and implications for competitiveness*, (California, Stanford University).
- (邦訳: しぎ原文七 訳, 『イノベーション・スタイル — 日米の社会技術システム変革の相違』(アグネ承風社, 1992年).)
- Link, A. N. (1996), "On the classification of industrial R&D," *Research Policy* 25, 397-401.
- Mansfield, E. (1980), "Basic research and productivity increase in manufacturing," 70, 863-873.
- Mowery, D. C. (1983a), "The relationship between intrafirm and contractual forms of industrial research in American Manufacturing, 1900-1940," *Explorations in Economic History* 20, 351-374.
- 27-43.
- Nason H. K. (1981), "Distinctions between basic and applied in industrial research," *Research Management*, 23-28.
- Rothwell, R. (1992), "Successful industrial innovation: critical factors for the 1990s," *R&D management* 22 (3) 221-239.
- Pavitt, K. (1991), "What makes basic research economically useful?," *Research Policy* 20, 165-174.
- Rosenberg, N. (1990), "Why do firms do basic research (with their own money)?," *Research Policy* 19, 165-174.
- Rosenberg, N. (1994), *Exploring the black box*, Chap.8: "Critical issues in science policy," (Cambridge Univ. Press).
- 植之原道行, 篠田大三郎 (1995) 『研究・技術マネジメント』コロナ社。
- 科学技術庁科学技術政策研究所編, 『体系科学技術指標 (1991年版)』, 大蔵省印刷局, 1992。
- 研究産業協会 (1992) 『我が国の民間企業における基礎研究の実情に関する調査研究』。(日本総合研究所調査を委託.)
- 総理府統計局 (1980) 『フラスカティ・マニュアル』(OECD から出されたものを翻訳)。
- 平野 千博 (1992) 「日本企業の基礎研究はどのような状況にあるのか」 『研究開発マネジメント』 2 (5), 8-15。
- 平野 千博・西瀧 千明(1990) 『我が国の主要企業における「基礎研究」について』(NISTEP REPORT No.8)。
- 矢作 嘉章 (1992) 「基礎研究における研究効率の指標 — 研究と生産・販売の「非線型プロセス」の視点から」 『研究・技術・計画』 7(3)。

パソコンOSにおけるGUIの発展要因の分析

姜 波 (97M42310) 指導教官 木本 忠昭

第一章：問題設定

1. 研究の背景と問題設定：

コンピュータとユーザーとの接点はユーザー・インタフェース (User Interface) と言われるが、グラフィカル・ユーザー・インタフェース (GUI) はパソコンのオペレーティング・システム (Operating System, OS) の重要な構成要素となっている。コンピュータをユーザーにとって使いやすいものにするためにOSのユーザー・インタフェース的な要素が果たす役割は大きい。

コンピュータの歴史において、GUI機能の進化はコンピュータ全体の進歩において欠かせない部分であり、GUIの進歩はコンピュータ技術進歩を反映している。また、ユーザー・インタフェースの革新は、ハードウェアの進化も促した。GUI機能はコンピュータの進化の結果であるとともに、ハードウェアおよびソフトウェアの進歩を左右する要因でもあった。すなわち、GUIの発展は、コンピュータの発展の中核的要因の一つであったと言える。従って、コンピュータの歴史を分析するには、GUIの歴史を分析することが重要であると言える。GUIの歴史については、これまでは、工学 (コンピュータ) 研究者の立場から、工学的興味に関連する部分がいくつか書かれている。しかし、それらは部分的で、全体史はまだない。そこで、本研究はGUIを構成する技術的個別要因や社会的関連に着目しながら、GUI発展の全体史を構築することを課題にする。パソコンの使い方や社会的側面についても分析する必要がある。

なお、GUIとは、「ウィンドウ (Window) とアイコン (Icon)、メニュー (Menu)、ポインティング・デバイス (Pointing Device) の4種、略してWIMPと呼ばれる要素を使用しているインタフェース」定義して分析を行う。

第二章：GUIの発展史

第一節：主要要素技術の開発

GUIの開発はコンピュータが、本格的に利用されるようになる1950年代後半から始まったと言える。その最初は、コンピュータの「計算」結果を見ながら処理調整が可能になるリアルタイム処理の研究から準備されてくる。次に大型コンピュータWhirlwindの開発には最初のディスプレイがコンピュータと接続されていたが、そのディスプレイの画面に、直接指示できるような装置ライトガンが開発された。この二つが接続された入出力装置は、その後展開されたGUIの開発の重要な出発点となったのである。

1950年代後半から1960年代初期までに、ディスプレイ及びライトペン (Lightpen, ライトガンの原理とほぼ同じ) の応用はコンピュータ支援設計、コンピュータ・グラフィックス

処理など多くの対話型コンピュータの研究に使用されていた。その中で、最も重要な転機になったのは、1963年に完成された図形処理システム「Sketchpad」であった。「Sketchpad」は初めて図形指向のインタフェースを試みたもので、ポインティング・デバイスとディスプレイの使用によって操作機能が拡張された。次に、1968年代末頃に完成されたNLSの開発過程では、いろいろなポインティングデバイスが比較され、より優れたポインティングデバイスであるマウスが試作されるようになった。しかも、ウィンドウ表示、文字と画像の混在表示可能になされたディスプレイ、直接表示などのGUI要素技術も試みられた。

第二節：要素技術の統合とGUI概念：

1970年代に入ると、一つは、分散処理コンピューティングの研究が広く展開され、手段としてのコンピュータのユーザー・インタフェースが明確に意識された。そして、1960年代末に進んでいたNLSやフレックスなどの研究から影響を受けて、XEROXのPARC研究所によって展開されたGUIの研究が、大きな影響を与えた。

もう一つの変化は、オブジェクト指向開発環境SmallTalkの誕生であった。SmallTalkの誕生に伴って、「操作環境」改善におけるGUIの有効性が十分認識された。同時に、SmallTalkはGUIの開発自体にも新しい手段になった。次に、1970年代から1980年代初期にかけては、オブジェクト指向環境を導入され、これが、この段階の重要な特徴になる。そして、ワークステーションをベースしたAltoのGUIシステムが誕生した。その後、Altoの後継機種として1981年に開発されたワークステーションStarでは、Altoで実現しなかったアイコン、オーバーラップ・ウィンドウ (Overlap Window) 表示、直接操作 (Direct Manipulation)、デスクトップ (Desktop)、ピットマップ・ディスプレイなどのGUI要素が次々登場してきた。Starは1970年代までのGUI技術のまとめになっていた。

第三節：パソコンLisaによるGUIの移行

Appleの誕生にともなって、コンピュータのユーザーは一層広がってきた。しかし、このApple IIに搭載されていたOSは自社開発したApple DOSであり、コマンドベースにしたインタフェースは、専門以外のユーザーに取っては、依然容易ではなかった。Apple IIの次に開発されたApple IIIは、Apple DOSに変わって、ProDOSが搭載されていた。Apple Computer社に初期の最も優れたOSと言われるこのProDOSにより全体の性能は向上している。しかし、ユーザー・インタフェースの改善は少なかった。そして、ハードウェアの不良、他の製品との互換性などの一連の問題があつて、Apple IIIは会社の経営を苦境に落ちた原因となった。1979年末に、Apple Computer社の技術者がXEROXのPARC研究所への見学することになった。見学の結果、技術者たちはSmallTalk言語の強い印象を受けた。その一ヶ月後、Apple Computer社は、見学に案内していたPARC研究所の技術者Larry Teslerを引き抜いてLisaの開発に入った。LisaにAltoで実現されたGUIを移植することを可能にしたのは、開発されたばかりのMotorolaの68000 (CPU) であった。

LisaのGUIの特徴：①特別のメモリ管理機構；①ピットマップ・ディスプレイ；②入力装置としてマウスが採用；③描画機能は自社で開発したQuickDrawを採用、など。ユーザー・インタフェースの完成度が非常に高いパソコンLisaは、パソコンにおける世界初GUIシステムであった。しかし、メモリなどの半導体の価格が高く、Lisaは9995ドルという高額な商品になってしまい、一般には普及しなかった。Lisaはその後、512バイトRAMと400Kバイトの3.5インチドライブを搭載したLisa II (1984) とMacintosh XL (1985) と変遷してきた。

第四節：パソコンGUIの展開

1. 統合操作環境の失敗：

Lisaの登場によって、GUIのパソコン操作における重要な役割に対する認識は一層明確にされた。Apple社の製品以外のパソコンユーザーでもGUIの操作環境の提供が強く要求された。この要求に応じて、各パソコンメーカーは自社のGUI操作システムの開発に乗り出した。1983年から、登場してきた統合操作環境 (Integrated Operating Environment) は、そうした流れから生み出した発想であった。統合操作環境とはマルチウィンドウに象徴され、同時に複数アプリケーション起動ができ、異なるプログラム間でデータのやり取りできる操作システムのことである。ソフトウェアの階層構造からいえば総合操作環境はアプリケーションとOSの間に入り、アプリケーションとのインタフェースを受け持つので、実質的にOSは不要になり、統合操作環境そのものがOSとしての役割を果たすようになると考えられた。「第二OS」ともいわれた。代表的な統合操作環境は、MS-Windows1.0やGEMやVisi OnやWindowMasterなどがある。

統合操作環境ソフトウェアの開発は結局失敗に終わった。その原因はハードウェアとOS両方にあったと考えられる。統合操作環境誕生の時期には、8088と8086の16ビットのマイクロプロセッサで処理速度やメモリの不足という問題であった。最大640Kしか対応できないOS上に統合操作環境は無理だった。また、OSと分離して考えてきた統合操作環境は、User Interfaceの問題を解決しようとした統合操作環境はOSと別々に作成されており、OSの性能を十分に生かすことができなかつた。ユーザー・インタフェースの革新にはOSと関連して開発しなければいけないという問題が認識されるようになった。

2. パソコンのGUIの展開:

1985年以後、ハードウェアの進歩がGUIの開発に新しい可能性をもたらした。すなわち、32ビット中央演算装置 (CPU) の登場につれて、メモリ制限の解決は容易になってきた。また32ビット中央演算装置が提供された仮想記憶空間管理機能でも、GUIに関する様々な可能性をもたらしてきた。例えば: MacOS, NeXT, MS-Windows2.0/3.0, OS/2, Amiga1.0/2.0, X-windowなど。

第五節: 共通のコンピューティング環境へ

パソコンの普及につれて、メーカーの違いのみならず、パソコンの規模もきわめて多様になり、多数のメーカー、多数のアーキテクチャをうまく統合しないことには、パソコンの利点が十分に引き出せなくなってきた。これに対して、基本的に二つのアプローチが考えられた。第一は、新しく、優れた操作環境を作るということで、TRONは、この考え方の代表であった。もう一つは、メーカーの違いはそのまま内部に残しておき、ユーザー・インタフェースを共通して、表面的に統一する方法であった。1989年に、Open Software Foundation (OSF) が結成され、三社 (Microsoft, DEC, HP) の技術を採用し、X-windowsのためのGUIシステムOSF/Motifが公開された。

この他にも、SUNとAT&Tが共同で開発しているOpenLookがあった。1993年三月、SUN、HP、IBMなど6社がCOSE(Common Open Software Environment)を結成した。Windows NTへの対抗としてUNIXのオープン化に必要なAPIの共通化OSFとUIの再統合が進められている。1986年にCommon Lispが成立して以来オブジェクト指向機能をはじめとしてさまざまな機能に対する検討が進められてきた。GUIもその一つである。

第三章: GUI発展の時代区分と発達要因の分析

第1節: 発展の段階区分と各段階の特徴

1. 段階区分と各段階の特徴:

前章で見たGUIの発達、次のような時代区分を行うことができる。

- ①第一段階 (1950~1960) : 主要要素技術が実験的に考案され、そして、ポインティング・デバイスとディスプレイによる原始的なGUIの実現。この時期は、ポインティング・デバイスとディスプレイによる原始的なGUIの実現。ポインティング・デバイスが重視されてきたが、ハードウェアのレベルに限界があったため、GUIの機能としては非常に貧弱であった。ウィンドウ表示、メニューなどのその他の要素技術も実験的に試みられ始めた。こうして個々の要素技術が作り上げられて行くに連れて、ユーザー・インタフェースにおける入出力手段パンチカード、キーボードによりさらに画面に直接指示に進化してきた。
- ②第二段階 (1970~1982) : GUIの概念が明確され、ビットマップ・ディスプレイ (Bitmap Display)、ウィンドウ表示、メニューなどは、AltoやStarなどに使用し始められ、実用性のあるGUIの開発が成功。
- ③第三段階 (1982~1990) : GUIのパソコンへの移植期。マイクロプロセッサをベースにしたパソコンのGUIが登場した。第二段階で開発されたGUIの技術を継承し、さらにマイクロプロセッサを搭載したパソコンへの移行が成功した。第二段階のハードウェア環境と異なるため、この時期のGUIは、第二段階のアイデアを参照して再創造したものであった。さまざまな特徴を持つGUIが登場してきた。ウィンドウ表示、アイコン、メニュー、ポインティング・デバイスの四つの要素がさらに活用され、表示の機能が向上した。文字処理画像処理、データベースだけではなく、3Dやマルチメディアなどの複雑なアプリケーションでも簡単な操作を可能にした。近年は、さらに単純な2DのGUIだけではなく、さらにに3Dアニメーション的なGUIに進化している。

第二節：発展要因の分析：

1950年代から1960年代までの第一段階では、この段階のハードウェアはまだ大変高価なもので、普及することが非常に難しかった。しかも、ユーザーには、少数の専門家に限定され、コンピュータの使用にも、科学計算、研究、事務処理などの分野に限られて、問題が主としてハードウェアにあった。

1970年代に入ると、1960年代の集中処理システムの問題が出てきた。特定のシステムや少数のシステムに多量の処理業務が集中するようになったため、CPUの負荷が増大し処理能力に限界が生じだし、応答時間も悪化した。こうして少人数の占有が可能になり、しかもデータを簡単に共用できる分散処理が要求され、高性能のネットワーク対応のワークステーションが必要になった。

ハードウェアの発展だけではなく、社会的な要因も大きく変わった。ユーザーの拡大に連れ、処理内容も前段階よりかなり変わった。科学計算だけではなく、ビジネスソフト、事務処理、ゲームなどが多く利用されるようになった。ユーザーの範囲も前段階のコンピュータ専門家から事務員や、学生などまでに広がってきた。このような発展の結果は、ユーザーにとっては、コンピュータの操作はまだ複雑であった。文字処理、財務処理、通信処理などの要求に対して、ユーザー・インタフェースの面における機能が貧弱なため、ユーザーには、コンピュータの限界が感じられた。また、ソフトウェアの複雑化に連れ、それまでのソフトウェアの開発方法は対応できなくなった。そこで、膨大なプログラムは、いくつの小さなプログラムに分けて作業が可能にしたオブジェクト指向言語SmallTalkにおける「クラス」と「カプセル」の考えが注目されてきた。

この時期に、ウィンドウ表示をサポートするビットマップディスプレイがGUIに有効な表示方式として定着されるようになった。しかし、このようなディスプレイはメモリの使用量がさらに多くなり、GUI開発にメモリ不足の問題が発生した。

1982年代以降は、アプリケーションの多様化が起り、処理内容も単一の内容ではなく、計算、文字処理、画像処理など様々なデータを同時に処理することが必要になった。こうしてもっと強力なOSが求められるとともに、使用効率を向上ユーザー・インタフェースも

強く要求されるようになった。第三段階では、第二段階のハードウェアとは異なるため、この時期のGUIは、第二段階のアイデアを参照して再創造する必要があった。一般に技術の発展は孤立的ではなく、技術と社会の関与する要因の存在には無視することができないが、GUIの発展もそうになっている。技術内部の構造から見れば、GUIの発展と関わった技術要因が非常に多いのである。大まかに分かれば、ハードウェアとソフトウェアの二つ分野がある。そのうちに、ハードウェアの中の中央演算処理装置（CPU）と記憶装置、ソフトウェアの中の言語、開発環境、OSなどは、各時期のGUI発展に無視できない要因である。また社会に関与した要因も重要と思われる。特に各時期に使用形態の変化、パソコンの普及状況、処理内容の変化などは欠かせない要因として働いている。GUIの開発は、ソフトウェア開発の割合はますます高まり、特にウィンドウ表示の実現方法は大変なノウハウが結集することである。開発自体を見ると、人材的な要因も無視できない。1960年代のNLSの開発から1970年代のAlto開発まで、1980年代にGUIの開発に取り込んだApple Computer社やMicrosoft社に至るまで、それぞれのGUI開発グループの中心人物は、会社間の移籍することが非常に多かった。彼らが、換言すれば、あるグループの人物群が各会社での開発に大きな役割を果たしている。

第三節：GUI発展の特質と問題点

極めて一般的に言えば、コンピュータにおける様々の分野の発展と同様に、GUIの発展も単純なものから複雑な機能へ、単一構造から多様化へと発展してきた。さらに、パソコンのGUIの発展は独自の特質を持っている。GUI機能の発展は、ハードウェアの性能（中央演算処理装置、記憶装置など）に依拠して普及程度ともに成長しているのである。また、GUIの発展には、ハードウェア、ソフトウェア及びOSの関係から見ると、統合と非統合の関係を持ちながら展開していることもある。

第四章：結論

1950年代から始まったGUIの発展は、三つの段階に分けることができる。GUIの発展は1970年代から始まったという見方は一般的であるが、本研究では、第一段階の研究結果を強調している。GUIの発展は、様々な社会要因および技術要因と関与しなから発展してきた。その要因が動いた状況によって、それぞれの性格を持つ段階ができて、さまざまな特徴を持つGUIが誕生してきている。OSに占める部分の増加に連れ、GUIの成長によるOSの肥大化が問題になってまでのが、この様な問題は、まだ今後のGUIの発展に影響を与えらると思われる。

付録：Graphical User Interfaceの歴史

- 1945：Memex提案（V.Bush）
- 1950：大型コンピュータWhirlwind稼働、displayとlightgun使用；
- 1951：Whirlwindのrealtime処理研究開始；SAGE開発開始、displayとlightgun使用；
- 1952：NC（数値制御）（MIT）；
- 1953：小型コンピュータTX-0製造開始（MIT）；米空軍のMIV開発開始（D.Ross）
- 1954：TX-2製造開始（最初のパソコンと言われる）
- 1955：MIV発表（Display Scope,lightgun使用）；SAGE使用；
- 1956：
- 1957：
- 1958：ICの開発；IBM7000登場；
- 1959：

- 1960 : ボーイング737CAD開発 ;
1960 : 「対話型コンピュータ」
1961 : 小型コンピュータLINCの設計開始 (MIT) ; PDP-1販売開始 ;
1962 : CADグループ結成 ; Flight Simulation使用 ; NLSの準備開始 (D.Engelbart) ;
1963 : Sketchpad(I. Sutherland) ; NLS発足 ;
1964 : IBM360発表 ; NLSの画面編集に関するの研究開始 (小型CDC3100使用) ;
1965 : NLSの画面編集に関するの研究
1966 : NLSの画面編集に関するの研究
1967 : Mouse試作 (D. Engelbart) ; LINC-8生産開始 ;
1968 : oN Line System(NLS)発表
1969 : FLEX試作 (Alan Kay) ; 4004の設計準備開始 ; NLS用のwindow機能設計開始 ;
1970 : PARC研究所設立 ; Alto開発開始 ; NLS全面利用開始 ;
1971 : 4004出荷開始 ;
1972 : 8008 (8bit) 開発 ; NLSで最初の統合「Help」開発開始 ;
1973 : Alto完成 (PARC研究所)
1974 : CP/M完成 ; 8080発表 ; Alto用Bravo誕生、世界初のWYSIWYGソフト ;
Bit-Map Display使用 (PARC) ;
1975 :
1976 : Ethernaet発表 ; Apple社設立。
1977 : Apple II発表 ; VisiCalc設計開始 ;
1978 : SmallTalk-76発表 (Ingalls) (ウィンドウ使用) ; 8086生産開始 ;
1979 : AppleDOS3.2発表 ; 8088出荷 ; 68000発表 ; Apple社の技術者PARCへ見学 ;
1980 : Apple III発表 ; 8086用UNIX開発開始 ; QDOS0.10出荷 ; CP/M-86出荷 ;
1981 : Star発表 (PARC研究所) ; MS-DOS1.0発表 ; Interface Manager開発開始 (MS社)
1982 : MS-DOS1.1発表。
1983 : SmallTalk-80の本出版 (A. Goldberg) ; Lisa発表 ; MS-DOS2.0発表 ;
Ms-windowsをIBMに紹介 (MS社) ; OS/2共同開発 (IBM&MS) ;
1984 : Macintosh発表 (Apple) ; Macintosh System Software1.0発表 ;
Postscript言語仕様発表 (Adobe) ; X-window開発開始 (MIT) ; MS-DOS3.0発表 ;
DOS用Topview発表 (IBM) ; ProDOS発表 (Apple社) ;
1985 : MS-Windows1.0発表 (タイリング・ウィンドウ方式、実用にならず) ;
Macintosh System Software2.0発表 ; MS-DOS3.2発表。
LisaをMacintoshXLと改名 (Apple社) ; Topview出荷 ;
1986 : Open Look開発開始 (AT&T) ; Macintosh System Software3.0発表、漢字TALK1.0 ;
1987 : MS-DOS3.3 ; Ms-Windows2.0発表 ; OS/2v1.0発表 ;
1988 : OSF結成 (IBM, DEC, HPなど) ; NeXTstep1.0発売 ; OS/2v1.1発表 ;
漢字TALK2.0登場 ; MS-Windows/386 2.1 ; Macintosh System Software4.1発表 ;
1989 : MS-windows2.11 (重合せ方式) ; UI結成 ; OMG結成 ; SunViewを発表 ;
1990 : X-window端末普及開始 ; IBMDOSJ4.05/v ; MS-windows3.0
1991 : Macintosh System Software7.0発表 ; MS-DOS5.0 ; AMIGA OS2.0 ;
1992 : 漢字TALK7.0 ; Ms-windows3.1発表 ; OS/2 v2.0発表 ;

『技術文化論叢』編集要項

1 発行趣旨

今日の科学・技術の発展は極めて急速であり、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呼んでいる。他方、技術開発を巡る国際的競争はますます激化しており、ここでも先進諸国間、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・方法論的あるいは広く社会科学的に論議する研究誌として公刊するものである。

2 発行主体

東京工業大学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。

4 発行回数

原則として年一回とする。

5 投稿資格

本学で研究・教育に携わるものとするが、編集委員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、修士論文・博士論文概要等とする。

8 原稿の提出時期および方法等については別に定める。

技術文化論叢

第3号

2000年5月1日発行

編集：技術文化論叢編集委員会

(江上生子 倭文知騎 中島秀之 *藁谷敏晴*: 長)

発行：東京工業大学社会理工学研究科技術構造分析講座

**TITech Studies in Science, Technology
and Culture**

No.3

Tokyo Institute of Technology