

核融合研究黎明期の歴史
—日本人研究者の動向を中心として—

平成 28 年 4 月

雨宮 高久

目次

第1章 序論	1
1. 背景：1960年代までの核融合研究開発史の概要	1
1.1 核融合研究黎明期における核融合研究開発の世界的変遷	1
1.2 日本における核融合研究開発史（1950年代-60年代）	4
2. 核融合研究開発史に関する先行研究	8
3. 本研究の目的と本稿の構成	10
文献と注釈	12
第2章 核融合専門部会とA-B計画論争	16
1. 本章の背景と目的	16
2. A-B計画立案の背景	19
2.1 核融合懇談会によるアンケート	19
2.2 菊池案	22
3. 核融合専門部会でB計画はなぜ推進されたのか？	23
3.1 第2回ジュネーブ会議の影響	23
3.2 専門部会におけるB計画推進論の展開	25
4. 研究者によるB計画への批判と解釈の変化	28
4.1 A-B計画に対する解釈の変化	28
4.2 研究者による核融合専門部会とB計画への批判	31
5. 専門部会でのB計画推進に対する捉え方の変化	33
6. 本章のまとめ	35
文献と注釈	37
第3章 日本原子力研究所・電気試験所・理化学研究所における	
核融合研究黎明期の歴史	40
1. 本章の背景と目的	40
2. 原研における核融合研究黎明期の歴史	41
2.1 原研における核融合研究の起源	41
2.2 原研における核融合研究のはじまり	41
2.2.1 プラズマ・ガンによる研究	41
2.2.2 理論研究	44
2.2.3 その他の研究課題：宇宙空間プラズマ研究	44
2.3 内部導体系装置JFT-1による研究	45
2.4 原研の核融合研究に影響を与えた宮本梧楼の「B計画哲学」	47

3. 電試における核融合研究黎明期の歴史	48
3.1 電試における核融合研究の開始と“研究項目”としての確立	48
3.2 テータピンチの研究開始と山田太三郎の IAEA 会議欠席	50
3.3 逆転安定磁場トーラスと宇宙開発関連技術研究の開始	50
3.4 100kJ テータピンチ装置完成と「核融合研究開発基本計画」への参画	52
3.5 山田太三郎の講演からうかがう 1960 年代における電試の核融合研究	54
4. 理研における核融合研究黎明期の歴史	57
4.1 理研核融合研究室の設立と起源	57
4.2 初期の核融合研究装置：高エネルギーアーク装置の建設と理論研究の開始	58
4.3 理研における核融合研究の確立	59
4.3.1 高エネルギーアーク装置による研究	59
4.3.2 マイクロ波・分光・探針に関する研究	60
4.3.3 プラズマ加熱や真空技術に関する研究	62
4.3.4 所外研究機関との共同研究	62
4.4 研究室から見た理研の核融合研究	63
5. 本章のまとめ	65
文献と注釈	66

第 4 章 日本における初期の核融合研究体制への

「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議」の影響	77
1. 本章の背景と目的	77
2. IAEA 会議への初めての対応に苦戦：第 1 回 IAEA 会議(1961 年)	79
2.1 第 1 回 IAEA 会議前の国内での対処	79
2.2 第 1 回 IAEA 会議概要と日本からの提出論文	80
2.3 第 1 回 IAEA 会議がもたらした国際会議への対応に関する課題	82
3. 世界的な研究方針の転換を実感：第 2 回 IAEA 会議(1965 年)	83
3.1 第 2 回 IAEA 会議に対する国内の対応	83
3.2 第 2 回 IAEA 会議概要と日本からの提出論文	85
3.3 第 2 回 IAEA 会議の日本への影響	86
4. 「内部導体系装置への悲観」と	
「トカマク旋風」の日本への影響：第 3 回 IAEA 会議(1968 年)	89
4.1 第 3 回 IAEA 会議への日本の取組み	89
4.2 第 3 回 IAEA 会議の概要と日本からの発表	90
4.3 第 3 回 IAEA 会議がもたらした日本の核融合研究への影響	92
5. 本章のまとめ	93
文献と注釈	95

3.4	会議報告論文から見る国際的トーラス討論会の内容	166
3.5	伏見康治の会議報告論文からみるトーラス討論会の背景	169
3.5.1	アルティモービッチの招聘失敗について	169
3.5.2	討論会の名称	170
4.	本章のまとめ	171
	文献と注釈	171
第7章	米国ジェネラル・アトミックの大河千弘グループにおける 内部導体系装置でのプラズマ閉じ込め研究のはじまりと展開	176
1.	本章の背景と目的	176
2.	GA社での内部導体系装置によるプラズマ閉じ込め研究のはじまり	178
2.1	GA社での核融合研究の開始と大河の参加	178
2.2	カーストと大河による内部導体系装置の検証	179
2.3	カーストの転出と直線状内部導体系装置の実験開始	180
2.4	トロイダル・オクトポールの実験と第2回IAEA会議での発表	181
3.	トロイダル・オクトポール研究	183
3.1	トロイダル・オクトポールでの微視的不安定性の確認と制御の試み	183
3.2	第3回IAEA会議での不安定性に関する発表	185
4.	トロイダル・クアドルポール研究	186
4.1	クアドルポールへの装置改造と観測された不安定性	186
4.2	第3回IAEA会議での報告：オクトポールとクアドルポールの比較	187
5.	再考：大河らによる内部導体系装置研究の意義	188
6.	本章のまとめ	190
	文献と注釈	191
第8章	本稿の総括	196
	謝辞	201

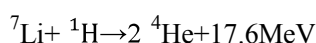
第 1 章 序論

1. 背景：1960 年代までの核融合研究開発史の概要

1.1 核融合研究黎明期における核融合研究開発の世界的変遷¹⁾

1920 年，英国の天文学者であるエディントン A.S.Eddington は星の進化を説明する際に，アストン F.W.Aston が行った原子量の精密な測定にともなう軽元素の同位体発見(1913 年)に基づき，水素とヘリウムによる恒星での核融合反応の可能性を指摘した．このエディントンの指摘は，原子核の融合反応によって莫大なエネルギーが発生するという「核融合」エネルギーの存在を初めて論じた研究と位置づけられている．ただし，チャドウィック J.Chadwick が中性子の存在を発見したのは 1932 年であるため，エディントンが指摘した段階では，現在のような正確な核融合反応の理論が構築できたわけではない．

その後，1928 年には「ガモフ全集」で知られるガモフ G.Gamow がアルファ崩壊に量子論を適応して，2 つの原子核間の強い相互作用がクーロン力を打破する確率を推論している．また，アトキンソン R.A.Atkinson とハウターマン F.G.Houtermans は 1929 年に太陽のエネルギーが水素からヘリウムへの核融合反応の結果であると確信し，定量的に天体の核融合を説明することを試みた．これに加えて，1932 年には英国のコッククロフト J.D.Cockcroft とウォールトン E.Walton が加速器での実験から



という反応を確認し，核融合反応によるエネルギーの発生を実験的に示した．さらに 1930 年末には，ベーテ H.Bethe やワイゼッカー C.Weizsäcker らによって，太陽の核融合反応サイクルが発表された．なお，気体の大部分の原子や分子が電離状態にあるものに「プラズマ」という名称をあてたのは米国の物理学者であるラングミュア I.Langmuir とトンクス L.Tonks で，彼らが 1920 年代末に書いた論文の中で，いわゆる「物質の第 4 の状態」を初めて「プラズマ」と称した²⁾．

このように，純粋な学問として核融合に関する研究が進められる一方で，核分裂反応と同様に，核融合反応の兵器への利用が検討されることになる．1942 年に米国の物理学者オッペンハイマー J.R.Oppenheimer やベーテ，テラー E.Teller らは原子爆弾によって生じた超高温で核融合反応を起させることを検討し，水素爆弾の可能性を指摘した．その後，米国は水素爆弾の製造を急ぎ，1952 年 10 月にはビキニ環礁で初めて水素爆弾の実証実験に成功する．また，これを追うようにソ連も 1953 年 8 月に実験を行った．このような軍事研究との結びつきが強くなったことで，核融合反応研究は徐々に各国で機密事項として扱われることになってしまう．しかし，同時期には米国，英国，ソ連などで瞬時の爆発現象に依らず制御された核融合反応を実現する研究，換言すれば「熱核融合反応の平和利用」に関する研究が本格化していた．例えば，英国では大電流放電による高温プラズマのピンチ効果やトラス装置での放電に関する研究結果が 1951 年から 52 年にかけて発表されている．と

ころが、これらの研究は英国政府によって非公開扱いとされ、この手の研究は全てハーウェル(Harwell)やオルダーマストン(Aldermaston)の研究所に集約されることになってしまう。そして、ハーウェル研究所において大電流環状ピンチ放電装置 ZETA(ゼータ, Zero Energy Themonuclear Assmby)による実験が始まった。他方、ソ連でも同国の水素爆弾開発に携わっていたことで有名なサハロフ A.Sakharov が 1950 年にタム I.Tamm と共同で、重水素中での大電流放電によるトカマク型の高温発生方法を提案していた。さらに 1951 年には後に「トカマク(Tokamak)の父」と称されたアルティモービッチ L.A.Artsimovich らによって、重水素を封入したトーラス装置の設計試案が発表されている。しかし当然ながら、これらの研究が一般に公開されることはなく極秘裏に研究が行われ、クルチャトフ(Kurchatov)研究所においてミラー装置 Ogra(オグラ)とトカマクの研究が進められた。米国では 1951 年からシャーウッド計画(Project Sherwood)³⁾が始動し、ロスアラモス科学研究所(LASL)でトーラス装置や直線状装置による Z ピンチの実験が、テラーやタック J.L.Tuck らを中心に開始された。また、プリンストン大学の天体物理学者であるスピッツァー L.Spitzer は、1951 年にピンチ装置とは異なる 8 の字型のプラズマ閉じ込め装置 Stellarator(ステラレータ)の計画を発足させている。その一方で、後に同装置の大家と称されたポスト R.F.Post は、ローレンス・リバモア(Lawrence Livermore)国立研究所で 1952 年に直線状ミラー(磁気鏡)型装置でのプラズマ閉じ込めを提案し、実験が進められた。

このように、各国で秘密裏に開始されたプラズマ・核融合研究は、1955 年に国際連合主催で行われた原子力平和利用国際会議(The United Nations Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 以下「ジュネーブ会議」)の第 1 回会議における議長バーバ H.J.Bhabha の発言をきっかけとして、徐々に公開される方向へと進むことになる。1955 年 8 月 8 日午前 10 時 50 分頃⁴⁾、バーバは開会挨拶の中で熱核融合の平和利用という課題を指摘し、さらに「20 年以内に制御された形で核融合エネルギーを解放する方策が見つげ出されるであろう」と予言した⁵⁾。この発言があった直後、記者会見に臨んだ米国原子力委員会(AEC)委員長のルイス・ストロース L.L.Strauss は記者たちへの対応に苦慮したという。ストロースは記者の核融合研究に関する質問に対して、米国が熱核融合エネルギー計画を遂行していることは認めたが、詳細は高度な機密事項であり、バーバが言うように水素エネルギーが近い将来に実現することはないと返答した。この翌々日の 1955 年 8 月 10 日に記者会見に臨んだコッククロフトも「英国は水爆の熱核反応を制御し、その膨大なエネルギーを平和目的に利用することを研究中である」と発言するが、自国で行われている研究の詳細は述べず、「努力すれば進歩が得られる」と答えたという⁶⁾。また、同 10 日の新聞記者会見で英国のジョージ・トムソン G.Thomson は「水素爆弾に用いられる反応型のエネルギーを一世代(30 年)以内に平和的用途に利用することが出来るようになるものと確信している」と発言し、制御核融合炉の実現の見通しに関して、バーバよりも長い 30 年という年数を示した⁶⁾。

ところで、このバーバ発言の波紋は大きく、トムソン以外にも制御核融合炉の実現に関する私見を述べる研究者が現れた。米国原子力委の委員であったラップ R.E.Lapp は著書『原

子力と人類』⁷⁾の中に、第1回ジュネーブ会議後の会場の様子を記している。ラップによると、バーテや彼の同僚達は「熱核反応エネルギーの利用には100年かかるかもしれない、成功には新しい方法が必要である」と述べ、バーバの発言に大変な不快感を示していたという。他方、第1回ジュネーブ会議直後の1955年10月に開催されたNICB(The National Industrial Conference Board)の第4次年会⁸⁾において、シリング H.Thirring(オーストリア原子力委)⁹⁾とスマイス H.D.Smyth(プリンストン大学)¹⁰⁾によって「熱核エネルギーの非軍事的利用の可能性」に関する講演が行われた。同講演において、シリングは「新たな予期できない発見」がない限り、制御核融合反応の実用化を達成することは望めないと述べ、スマイスも米国の機密計画に参加していたために研究の詳細を述べることはなく、講演は原子核物理学の歴史を述べるに留まったという。ただし両者の講演には大きな違いがあり、核融合反応炉をシリングが加速粒子をターゲットにぶつける加速器方式を想定していたのに対して、シャーウッド計画にも参画していたスマイスは、プラズマの磁場閉じ込め方式を想定して話を進めていた。

その一方で、プラズマ・核融合研究公開の流れは、1956年4月にソ連フルシチョフ N.S.Khrushchev が物理学者クルチャトフ I.V.Kurchatov らをともなって英国ハーウェル研究所を訪問し、所長であったコッククロフトに対して自国のプラズマ・核融合研究を公開する準備がある旨を伝えたことで、さらに加速することになった。そして、1956年4月25日にクルチャトフがハーウェル研究所にて自国での核融合研究の現状と成果に関する講演を行い、ソ連の直線状大電流ピンチ放電の実験で温度100万度が数マイクロ秒発生し、中性子が観測されたことを発表した。

これ以降、米・英・ソに加えて、フランスやスウェーデン、ドイツなどでもプラズマ・核融合研究に関する実験が開始され、世界規模で研究公開の機運が高まっていった。その結果、1958年9月に行われた第2回ジュネーブ会議では、プラズマ・核融合研究の分科会が設けられ、これまでに各国で行われてきた研究成果が一斉に公開されることになった。ところが、アルティモービッチによる会議の感想「アイディアが展示場に並んだ感じ」が示すように、さまざまな配位を持つプラズマ閉じ込め装置が提案された反面、どの装置も異常拡散(ボーム拡散)や不安定性に悩まされ、プラズマを長時間装置内に閉じ込めることは出来ないということが各国の共通する研究成果であった。その結果、プラズマ・核融合研究開発を一国単位で秘密裏に行っているにもかかわらず実現しないという考えが、研究者の間での共通認識となっていた。このような状況を踏まえて、国際原子力機関(IAEA)主催でプラズマ・核融合研究に特化した国際会議である「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議(The International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 以下「IAEA会議」)」の第1回会議が、1961年9月に開催されることが決定する。

しかし、IAEA会議が開催されたからと言って、不安定性の問題が簡単に解消されることはなかった。オーストリアのザルツブルクにて1961年9月に開催された第1回IAEA会議では、英国のZETAや米国のStellarator-C(Model C-Stellarator)、ソ連のOgraなどの装置によ

る実験結果が提示されたが、不安定性を解決する結果は出されなかった。そのため、会議の総括を行ったアルティモービッチは「我々は煉獄の中にいる」と現状を表現した。ただし、そのような状況においても、第1回IAEA会議ではソ連のヨッフエ M.S.Ioffe らによって、ミラー装置に Ioffe-bar という安定化ワインディングを付加した複合磁場を用いた極小磁場配位の実証実験が示され、わずかながら研究の進展も見られた。さらに、1965年開催の第2回IAEA会議と1968年開催の第3回IAEA会議において、Ioffe-bar に続く画期的な進展が発表される。第2回IAEA会議では、米国 General Atomic(ジェネラル・アトミック, GA 社)に所属していた日本人研究者である大河千弘らが、内部導体系装置での実験からトーラス装置における平均極小磁場配位の有効性を提示した。また、第3回IAEA会議においては、ソ連のトカマク T-3 が実験でボーム時間の30倍の閉じ込め時間、1keVの電子温度を示し、研究者たちの注目を浴びることになった。その後、トカマク T-3 で観測された電子温度の値には不確かさが指摘されたことを踏まえて、第3回IAEA会議後に英国カラム研究所の所長ピーズ R.S.Pease とアルティモービッチは、カラム研究所のチームによる T-3 の電子温度計測に同意する。このことは、プラズマ・核融合研究分野における本格的な国際共同研究のはじまりと称されており、東西冷戦下にある当時としては非常に稀な出来事であった。そして、カラム研究所チームによる計測の結果、アルティモービッチらが第3回IAEA会議で発表した T-3 の内容には誤りがないことが確認されたため、1970年代には各国でのトカマク装置建設のラッシュへと繋がったという。

このように、恒星の核融合反応に関する研究を展開するかたちで、1950年代から各国で秘密裏に始まった核融合研究、換言すれば「熱核融合反応の平和利用」は当初のもくろみに反して、その研究開始直後からプラズマ中に生じる不安定性や拡散現象に閉じ込めが支配され、楽観視されていた核融合反応によるエネルギー炉の実現は遠い将来の夢物語になってしまう。しかし、1960年代に入ると、Ioffe-bar を付加したミラー装置や内部導体系装置によって状況は好転しはじめ、最終的には1960年代末にトカマク装置の有用性が実証されるに至った。そのため、一般に1960年代の核融合研究開発は研究者たちの努力によって、第1回IAEA会議でアルティモービッチが総括した「煉獄」を抜け出す段階として、同分野の歴史の中に位置づけられている。

1.2 日本における核融合研究開発史(1950年代-60年代)¹¹⁾

次に、1950年代から60年代にかけての日本国内における核融合研究開発の動向を見て行くことにする。

日本で核融合研究への関心が本格的に高まったのは、第1回ジュネーブ会議でのバーバ発言が契機とされている。現に、ジュネーブ会議の翌年である1956年4月には京都大学基礎物理学研究所(基研)で「超高温研究会」が開催されている。また、6月2日には大阪大学工学部の岡田実によって公開実験が行われ、基研の研究会と同名の「超高温研究会」が結成された。さらに同年11月17日には、日本原子力研究所(原研)で「核融合コロキウム」

が、1957年12月には電気試験所(電試、現在の産業技術総合研究所)で「第1回核融合反応研究会」が東京大学理学部の宮本梧楼を幹事として開かれている。

このような研究会の開催を踏まえて、研究者たちは彼らの自主的組織として「核融合懇談会」を組織した。1958年2月に結成された同懇談会は研究者だけでなく、核融合研究に関心があるジャーナリストや行政家などを含み、1959年には総数200名というかなりの規模になっていた。なお、核融合懇談会発足の背景には、国家主導による原子力体制への危惧、換言すれば、核分裂と同じ轍を踏んではいけないという考えが研究者たちの中にあつたことが影響していたといえる。なお、同懇談会の発足に際しては、1958年2月に「核融合シンポジウム」が開催されており、7月に日本大学を事務局として「核融合懇談会」の会誌『核融合研究』が刊行されることになった。

その一方、プラズマ・核融合研究体制が国家レベルで構築されるきっかけとなったのは、旧総理府原子力委員会が開催した核融合反応懇談会であった。第1回核融合反応懇談会は1957年2月6日に開かれ、以下の学識経験者が招集された：石川一郎、藤岡由夫、有沢広巳、湯川秀樹、駒形作次、嵯峨根遼吉、杉本朝雄、後藤以紀、岡田実、伏見康治、中村誠太郎、畑中武夫、本多侃士、武谷三男、林忠四郎、法貴四郎。同会では、素粒子や原子核、宇宙物理、放電、電気工学等々の関連分野について、基礎や高温発生、天体物理における研究の現状が報告され、今後の方針に関する意見交換が行われた。同年10月19日には第2回核融合反応懇談会が開催され、委員に補充された宮本梧楼が核融合反応の一般的問題と新しいプラズマ粒子加速機構に関する提案についての講演を、本多侃士がベニスで行われた第3回電離気体現象国際会議(The Third International Conference on Ionization Phenomena in Gases)での超高温プラズマ研究発表の報告を行った¹²⁾。また、原子力局が作成した「核融合反応に関する当面の方針について」をもとに討論が行われ、同懇談会会長には湯川、幹事には嵯峨根、菊池、伏見、早川の四名があたり、開放的な会として広く各分野の研究者の参画を呼び掛けるようになった。このほか、同会では旧科学技術庁予算の「原子力平和利用研究委託金」の配分に関しても審議されている。

その後、核融合反応懇談会の基本的対応策に則るかたちで、原子力委員会は1958年4月に下部組織として核融合専門部会を設置し、将来の核融合研究体制に関する審議を行うことになった。同部会は翌1959年3月に中間答申「核融合反応の研究の進め方について」を提出する。この答申において、「新しい着想の育成と具体化」を目的として、講座増強と基礎研究の推進、研究者の養成、さらには新着想の検討と装置試作を目的とする研究グループの創設を目指したA計画と、諸外国で一定の成果を出した高温発生装置を3億円から10億円規模の「中型装置の建設」を行うB計画の二案が提示され、両計画の併行実施が立案された。この後、B計画に関しては、原研内に「核融合研究委員会(通称「B計画委」)」が組織され、1959年6月にはミラー装置とステラレータ装置を提案するB計画中間報告書がまとめられ、核融合専門部会に提出された。

他方、科技庁主導で行われた上記議論とは別に、文部省側でも核融合懇談会を中心に将

来の核融合研究体制について議論が進められていた。その契機は、1958年10月15日に核融合懇談会長である湯川から日本学術会議会長宛に、大学における核融合研究体制の創設に関する要望書が出されたことに端を発する。これを踏まえて、学術会議は科技庁に対して「核融合反応研究の促進について」(1958年10月31日付)を勧告した。その後、1959年4月22日の第28回総会で原子力問題委員会委員長であった坂田昌一によって、学術会議下の特別委員会として「核融合特別委員会」の設置に関する提案が行われた。設置の理由は、「核融合の研究は多方面にわたる学問の新分野であるため、今その基本的な研究方向についての見通しと方針を立てるべきである」というもので、基礎研究であっても大規模な装置を必要とし、研究費は増額の傾向にあるため、学術会議下に早急に核融合研究に関する特別委員会を創設することが強調された。その結果、同提案は認められ、1959年5月14日に第1回核融合特別委員会が開催された。

これにより、科技庁側の核融合専門部会と文部省側の核融合特別委員会という二元体制のもとで、A-B計画は議論されることになった。しかし、原子力委員会の下部組織である核融合専門部会で立案されたA-B計画、特にB計画には研究者のあいだでは不信感が高まっていた。このことは、1959年5月14日に日本学術会議講堂で開催された「核融合研究の方針に関するシンポジウム」で一気に露呈することになる。このときの出来事は、「A-B計画論争」として、1960年代半ばまでの日本の核融合研究体制を決定づけたものと評価されている。結局、核融合専門部会はB計画の見送りを決定し、研究方針の決定は核融合特別委員会に舞台を移すことになる。そして、核融合特別委員会では研究所創設に関する議論が本格化し、第4回委員会の中で、木原太郎を委員長とする「プラズマ科学研究所(仮称)設立準備小委員会」が設置される。この後、核融合特別委員会や同委内の小委員会での議論を踏まえて、学術会議も1959年11月に政府に対して研究所設置を勧告し、1960年7月にはその設置が決定する。そして、1961年4月に名古屋大学附置研究所として「プラズマ研究所」(プラズマ研)が創設された。同研究所では、QPやBSG、TPD、TPMといった装置によって、主としてプラズマ物理学に関する基礎研究や計測技術の開発などが行われている。その一方で、京都大学のヘリオトロン装置や大阪大学におけるコニカルピンチガン、日本大学のテータピンチ装置など、各地の大学でもさまざまな装置による実験が遂行された。これに加えて、原研では同軸プラズマガン、電試や三菱原子力ではトロイダルピンチ、理研ではアーク放電装置による研究が行われた。

「A-B計画論争」の結果、B計画が先送りになったことで、日本国内ではプラズマ研を中心とする基礎研究重視の姿勢が取られた。しかし、1963年4月の第26回核融合特別委員会において、科学技術庁の原子力平和利用研究委託金や文部省の科研費機関研究費が60年代半ばで打ち切られることを見越して、将来計画の検討に関する議論が再燃することになる。現に、科研費機関研究費は1963年3月に終了してしまい、同年4月からは特定研究が認められるが、1年間に限ったものになってしまう。これに加えて、原子力平和利用研究委託金の打ち切りによって企業が核融合研究から撤退してしまった。そこで、核融合特別委員会

では将来計画小委員会を設置して検討を開始した。そして、第2回 IAEA 会議後の世界的な研究方針の変化を踏まえて、関口忠を委員長とする第2次将来計画小委員会では「ピンク・パンフレット」と称された「プラズマ核融合将来計画(第2次案)」が取りまとめられ、「総合装置的アプローチ」の必要性が明確に強調された。なお、この期間に核融合特別委員会は廃止されることになり、1966年6月からは原子力特別委員会核融合部会がその役割を引き継ぐことになった。

他方、原子力委員会が1967年4月に改定した「原子力開発利用長期計画」では、長期計画専門部会核融合分科会(主査：駒形作次)の報告を受けて、核融合の基本方針が次のように提示された¹³⁾；

核融合が実用化されたあかつきには、ほとんど無尽蔵のエネルギーの供給が可能となるものであり、将来におけるわが国のエネルギー問題を究極的に解決することが期待される。

核融合の研究については、米国、英国、ドイツ、フランス、ソ連等の諸国においてプラズマ物理の分野にとどまることなく、核融合を明確な目的とする研究開発を強力にすすめており、プラズマの挙動の解明等に大きな成果をあげ、新たな発展段階に入りつつある。これらの諸国においては、核融合反応を持続しうる高温プラズマ発生装置である零出力核融合炉の研究開発にその重点を指向するようになった。

わが国における核融合に関する研究は、大学を中心として、プラズマの体系的研究の分野では成果を収めてきているが、核融合を明確な目的とする研究開発はほとんど行われていない現状である。

したがって、海外における新しい発展段階に伍して、わが国の研究をすすめるためには、プラズマ物理に関する基礎的な研究の充実をはかるとともに、核融合を明確な目的とする総合的な研究開発を順次計画的に推進すべきであり、このため、わが国の状況に適した装置の型式、研究開発の体制等、その推進方策を早急に検討する必要がある。この研究開発は、可能な限り早期に着手することを目途に、必要な準備を行うものとする。

この長期計画に示す核融合研究計画を遂行するにあたって、原子力委員会は(第2次)核融合専門部会(部会長：菊池正士)を設置し、研究開発に必要な第一段階の装置開発のための具体的方策を諮問した。審議事項となったのは、(1)第一段階の実験装置の型式と規模について、(2)第一段階の実験装置の設計および製作ならびにこれによる実験等の研究計画について、(3)具体的開発体制および大学、民間企業に協力を期待する事項についての三点である。その結果、在米日本人研究者である大河千弘や吉川庄一の意見も踏まえて、1968年7月に原子力委員会は「核融合研究の推進について」と「核融合研究開発基本計画」を決定する。このことにより、核融合研究開発は「原子力特定総合研究」に指定され、1969年度から原研、電試、理化学研究所(理研)が研究計画を遂行する機関となった。具体的には、「1969年から6年間を原子力特定総合研究・核融合研究開発の第1段階とし、トーラス磁場装置の

研究を主計画として推進する。この計画推進には原研があたり、理化学研究所は関連技術開発を行う。また、副計画として電気試験所は高ベータ・プラズマ装置の研究に当る」とされた。

2. 核融合研究開発史に関する先行研究

上記で論じた核融合研究開発史は、先行研究で論じられたものを取り纏めたものである。ここでは、主として日本の核融合研究開発史に関する先行研究の背景と状況について概観したい。核融合研究開発の歴史は、これまでも科学史や科学社会学、プラズマ・核融合の各分野の研究者によって調査・研究が行われてきた。特に、核融合研究が巨大科学(ビッグ・サイエンス)の一分野であることもあって、科学と社会の関係を論じる場合の一例として取り扱われたこともある。

例えば、1979年11月に科学史家である中山茂(東京大学)は、プラズマ研所長の高山一男宛てに次のような書簡を出している¹⁴⁾；

名古屋大学プラズマ研究所所長
高山一男先生

中山茂

拝啓 時下ますますご清栄のこととおよろこび申し上げます。埼玉大学の手塚晃先生からご紹介をいただいたと存じますが、貴研究所を訪問し、見学とインタビューをお願いいたしたく存じます。ご多忙中まことにご迷惑とは存じますがよろしくお取計い下さいますようお願い申し上げます。

私供の研究グループは新しい萌芽的な研究活動が発展し、専門分野として確立していくまでのプロセスに関心をもっております。その一環として、今回、プラズマ・核融合の研究活動をケーススタディの対象としたいと考えております。

訪問の詳細は下記のとおりといたしたく存じます。まずはお願いのみ申し上げます。

敬具

中山は、米本昌平(三菱化成生命科学研究所)、荒井克弘(大学入試センター)、塚原修一(筑波大学大学院)、吉岡斉(東大大学院)の四名と一緒にプラズマ研を訪問したようで、同書簡には彼らがインタビューで高山に尋ねる内容として、

- ・草創期の研究活動の歴史、研究者のリクルートメント
- ・草創期に立会った世代の研究者とそれ以降の世代の差異、たとえば出身分野、研究活動、意識の上で
- ・若手研究者のトレーニング、研究と教育の関係
- ・研究費、研究施設の状況
- ・現状における研究上の問題点

が挙げられている。なお、中山らの訪問の際、プラズマ研の早川幸男は中山の要請に応じて日本における核融合研究の草創期について講義をしたようである¹⁴⁾。この後、中山と一

緒にプラズマ研を訪問した吉岡は、戦後日本の核融合研究の形成と展開に関して、意思決定過程分析を中心とした論考¹⁵⁾を発表し、さらに中山ら編集による『通史 日本の科学技術』においても、プラズマ・核融合研究開発史を大学・文部省機関と科技厅機関という二つの観点に分けて、研究の変遷を主として二次資料をもとに取りまとめた上で、そこに見られる問題点の論究に努めている¹⁶⁾。

他方、中山らに講義をした早川は、1987年に木村一枝と共にプラズマ研に残されていた史料を用いて、『核融合研究』に「核融合研究事始め(1)(2)(3)」と題した論考を投稿している¹⁷⁾。木村いわく、早川は常々、日本の科学史家に不満を持っていたという。「日本の科学史が日本の科学の発展に寄与しているとは思えない」、「科学史研究者は日本の科学のために役に立つことをしていない」という考えが早川の中にあっただけという。また、核融合研究開発の歴史を重視した背景には、自分たち核融合研究者が核融合の行く末について責任を持つべき(あるいは持たざるを得ない)との見解を持っていたことが影響していたようである。そのため、後述する日大科学史研究室を中心とするグループがプラズマ・核融合研究の歴史研究を本格的に始動した際に、木村が科学史の専門家である日大グループに任せられた方が良くと述べると、早川は「日大には任せられない、自分たちでやらなければならない」と述べたという¹⁸⁾。早川と木村による「核融合研究事始め」では、(1)で核融合反応懇談会と核融合専門部会での議論の経緯、(2)でA-B計画論争の動向と核融合特別委員会、(3)でプラズマ研創設までの経緯が、一次史料を併記するかたちで取り纏められている。

日本大学理工学部物理学科科学史研究室においても、核融合研究開発の歴史調査は、長年にわたって一つの研究課題とされている。そもそも、科学史研究室が創設された背景には、方法論的観点から科学(特に核融合)を研究するという考えがあり、研究室発足当初にも広重徹は、『自然』や『科学読売』等の科学雑誌に核融合研究の現状や天体の核融合反応の研究史に関する解説を書いている¹⁹⁾。ただ、本格的に核融合研究開発史の調査・研究が科学史研究室の研究課題となったのは、1980年代に西尾成子が戦後巨大科学の典型として核融合研究を取り上げたことに端を発する²⁰⁾。また、日本大学理工学部物理学科および日本大学原子力研究所(現在の量子科学研究所)では、国内で早くから核融合研究を開始した研究機関の一つであることも研究開始の背景にあっただけという。なお、同課題はそれまでの研究とは違った新しい研究方法を手探りで確立しながら進める必要があるとして、同研究室の植松英穂と共同で研究が開始された。まず、西尾は川崎栄一や濱田繁雄、川上一郎ら同物理学科や原子力研究所に所属していた核融合研究従事者への聞き取りを始めた。それが元原研副理事長の山本賢三や元原研理事の森茂に及んだ際に、森の尽力によって1995年度からの3年間、原研の委託調査として「核融合研究の歴史」が採択され、同課題に関する大規模な調査が開始された²¹⁾。同委託調査では、核融合研究従事者と科学史研究室のメンバーで「核融合研究資料調査会」²²⁾が創設され、全国の大学などでの資料調査・収集や計23名の研究者へのインタビュー調査が行われた。同調査会では各年度で業績を取り纏めた報告書²³⁾を作成しているほか、西尾や植松らは『日本物理学会誌』²⁴⁾や日本科学史学会の欧

文誌 *Historia Scientiarum*²⁵⁾に国内における核融合研究開発史に関する論文を、また日本物理学会や日本科学史学会、日本科学術史学会等の各学会にて研究成果を発表してきている。

以上に述べてきたような核融合研究開発史調査やそのための資料調査・収集を背景として、1999年度からは自然科学研究機構核融合科学研究所(NIFS)で西尾を研究代表者として、共同研究「わが国の大学における核融合研究に関する資料調査研究」が開始され、より多くの史料の収集や整理、分析などの作業が進められた²⁶⁾。そして、NIFSが日本の核融合研究における中枢機関であることから、同作業が組織的かつ永続的に行われるべきであるとして、2005年1月1日に核融合アーカイブ室(初代室長:松岡啓介)が創設された²⁷⁾。また、同室の創設にともなって、NIFSでは「核融合アーカイブズに関する共同研究」を開始する。その結果、組織的・系統的な史料収集、研究者へのインタビュー(オーラル・ヒストリー)の実施、年表の作成、史料に基づく科学史研究が行われ、現在では核融合アーカイブ室を中心として、日本原子力研究開発機構(JAEA)や筑波大学、京都大学なども連携した核融合研究に関するアーカイブが構築されつつある。また、核融合アーカイブ室の共同研究に基づく史料収集やデータベース化の手法研究および核融合研究開発史の調査結果は、学会発表や論考として報告されてきている。

このほか、核融合研究者によって歴史が取り纏められた例がいくつか存在する。上記にも名前が出てきた山本²⁸⁾に加えて、宮本健郎²⁹⁾や山中千代衛³⁰⁾が著書や論文を発表している³¹⁾。さらに、NIFSやその前身であるプラズマ研³²⁾、JAEAやその前身の原研³³⁾などの年史にも、同機関における核融合研究の経過が総括されている。

3. 本研究の目的と本稿の構成

このように、日本の核融合研究開発史に関する先行調査・研究は多数存在する。その結果、主だった歴史については明らかとなり、成果は年表として体系的にまとめられている。しかし、この現状を逆説的にいえば、作成された年表は主要な出来事の網羅に終わっていて、それらの出来事を研究者個人の動向を踏まえた上で詳細に評価した例はほとんど見られない。このことは、1.2節に記した1950年代から60年代の核融合研究黎明期の歴史を述べた先行研究において顕著に見受けられる。その要因には、早川と木村の論考「核融合研究事始め」が挙げられる。彼らの論考には一次史料の内容が併記された上で黎明期の歴史が記述されているため、それ以降の核融合研究開発の歴史研究において引用される頻度の高い二次資料になっている。ところが、そのことが裏目になってか、同時期の歴史調査は早川・木村の論考以上に詳細な研究がなされておらず、未調査および再検討すべき内容が多数あると評せざるを得ない。一見すれば、先行研究から既に全てが明らかになったように思える1950年代から1960年代の日本の核融合研究開発の変遷も多数の史料から再調査し、あらためて歴史を評価する必要があるといえる。

ただ、先行研究が発表された段階では史料が散逸しており、歴史の詳細な調査・研究および評価が難しいという状況にあった。現在、NIFS核融合アーカイブ室を中心とする各研

究機関でのアーカイブ活動が進んだ結果、以前よりも歴史研究を行いやすい環境が整備されてきたといえる。また、先行研究が大まかではあっても、日本における核融合研究開発の歴史の変遷を年表などのかたちで取り纏めたことによって、「再評価すべき内容」も浮き彫りになったといえる。その一例を挙げると、1959年頃に国内で起こった「A-B 計画論争」において、核融合専門部会が A-B 計画を立案した背景には第 2 回ジュネーブ会議に出席した宮本梧楼が両計画の併行実施を主張したことがきっかけとされているが、「国内の核融合研究は基礎研究から始める」という方針が研究者のあいだでの共通認識として持たれていた中で、「何故、宮本はそのような主張をしたのか」ということについては、先行研究では触れられておらず、喧々諤々の議論の後に B 計画が先送りになったことのみが取り扱われているだけである。つまり、「A-B 計画論争」は国内の核融合研究開発史上で重要な出来事であったと評されているにも関わらず、研究者個人の考え方などを踏まえた上での詳細な歴史調査が行われて来ていないのが現状なのである。また、プラズマ研や NIFS のように核融合研究に特化した研究機関と違って、原研や電試、理研における核融合研究は同機関で行われた数多くの研究内容の一部でしかなく、年史に纏められた内容は限定されたものになっている。また先行研究で取り扱われている内容も、上述した「核融合研究開発基本計画」に基づく研究が遂行された 1969 年以降の歴史が中心となっている。このような現状を考慮すると、原研、電試、理研の 1950 年代から 1960 年代における核融合研究開発の変遷は、本格的に調査・研究する必要があるといえる。さらに、同分野の研究において後進国であった日本は、諸外国から研究成果や知識を輸入する立場にあった。そのため、国内での研究の経過に加えて、同時期における国内の研究者コミュニティによる国際交流に関する取組みも併せて調査しなければならない。その中でも、「核融合分野のオリンピック」³⁴⁾と称されている IAEA 会議への日本国内の取組みや研究成果の受容についての調査・研究は必要不可欠であると考えられるが、先行研究で論じられているのは、会議での主だった成果のみである。これに加えて、在米日本人研究者として同時期に大河千弘と吉川庄一が活躍したことは先行研究でも述べられているが、研究を学説史的に取り扱ったものは見られない。彼ら、特に大河が行った内部導体系装置によるプラズマ閉じ込めの研究は日本にも多大な影響を与えており、詳細にその変遷を調査する必要がある。

そこで、本稿では日本人研究者の動向に着目し、先行研究で詳細に取り扱われていない項目を学説史および社会史の両観点から明らかにした内容を論ずることで、1950 年代から 1960 年代までの「核融合研究黎明期」における核融合研究開発の歴史を明らかにすることを目的とする。第 2 章では、当時非公開であった核融合専門部会議事録や研究者の論考を用いて「A-B 計画論争」の背景と考え方を明らかにする。第 3 章では、1950 年代から 1960 年代にかけての原研、電試、理研のプラズマ・核融合研究の変遷を論じ、第 4 章と第 5 章では 1960 年代に開催された第 1 回 IAEA 会議から第 3 回 IAEA 会議までの日本国内での取組みと会議に出席した研究者が記した会議報告論文を調査した結果を述べる。第 6 章では、国際交流史の観点から日本国内で初めて開催された原研主催の「国際的トーラス討論会」

(1971年)開催までの国内での国際会議誘致・開催の動向をまとめ、第7章では日本の研究にも影響を与えた在米日本人研究者である大河千弘らジェネラル・アトミック(General Atomic, GA社)での内部導体系装置の研究史を論ずる。そして、第8章では各章の内容をまとめることにより本稿の内容を総括する。なお、第2章から第7章にかけては冒頭にて各章で論ずる内容を踏まえるために、本章とは別に、各章に対応した背景と目的を論ずることとする。

文献と注釈

- 1) 1.1節は、以下の文献に基づき、内容を取り纏めた。

広重徹「核融合反応とは—歴史と展望—」『自然』1958年5月号, 3-12頁。
広重徹「核融合研究の50年史」『科学読売』1958年9月号, 19-23頁。
西尾成子『核融合研究の歴史』日本原子力研究所委託調査報告書, 日本大学理工学部, 1995年, 1-6頁。
山本賢三『核融合の40年』ERC出版, 1997年, 10-14頁。
宮本健郎『プラズマ物理・核融合』財団法人東京大学出版会, 2004年, 257-262頁。
C.M.Braams, P.E.Stott, *Nuclear Fusion Half a Century of magnetic Confinement Fusion Research*, (IoP, 2002).
- 2) L.Tonks, I.Langmuir, “Oscillations in ionized gases,” *Physical Review*, 33(1929): 195-211.
- 3) A.S.Bishop, *Project Sherwood-The U.S. Program in Controlled Fusion 1958* (Addison Wesley, Reading Mass, 1958).
- 4) 『朝日新聞』1955年8月9日1面。
- 5) H.Bhabha, “Presidential Address,” *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy* Vol.16, record of the conference (New York: United Nations, 1956): 35.
- 6) 『朝日新聞』1955年8月11日夕刊3面。
- 7) Ralph E. Lapp, 西脇安他訳『原子力と人類—分裂した原子と分裂した世界の物語—』東洋経済新報社, 1959年, 258-278頁。
- 8) 川村泰治「熱核反応のうらおもて」『自然』1956年2月号, 20-21頁。
- 9) Hans Thirring, “Thermonuclear Power Reactor-Are they feasible?,” *Nucleonics*, 13(11) (1955): 62-66. / Hans Thirring, *Power Production, The Practical Application of World Energy* (George G.Harrap & Co.,Ltd., 1956). / 『朝日新聞』1955年11月1日2面。
- 10) Henry DeWolf Smyth「熱核反応の平和利用」『自然』1956年2月号, 16-21頁。 / 『朝日新聞』1955年11月4日2面。
- 11) 1.2節は、以下の文献に基づき、内容を取り纏めた。

植松英穂, 竹田辰興, 西尾成子「日本における核融合研究開発の歴史」『日本物理学会誌』第56巻第6号(2001年), 395-402頁。
山本賢三『核融合の40年』ERC出版, 1997年, 25-131頁。

- 吉岡斉「大学系の核融合研究」, 中山茂他編集『[通史]日本の科学技術 3』学陽書房, 1995年, 133-145頁.
- 吉岡斉「核融合研究の本格的展開」, 中山茂他編集『[通史]日本の科学技術 4』学陽書房, 1995年, 193-206頁.
- 12) 本多侃士「気中放電に関する第3回国際会議に出席して」『日本物理學會誌』第12巻第12号(1957年), 596-598頁.
- 13) 原子力委員会『原子力開発利用長期計画』, 1967年, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID: 002-10).
- 14) 「核融合研究の歴史(早川講義)」 / 「書簡: 名古屋大学プラズマ研究所の見学とインタビューのお願い(東大中山茂から名古屋大学プラズマ研究所所長高山一男宛)」, NIFS核融合アーカイブ室資料(ID: 301-19)
- 15) 吉岡斉「戦後日本の核融合研究の形成と展開—意思決定過程分析を中心として—」『歴史学・地理学年報』第16号(1992年), 63-105頁.
- 16) 前掲11), 吉岡.
- 17) 早川幸男, 木村一枝「核融合研究事始め(1)」, 『核融合研究』第57巻第4号(1987年), 201-214頁. / 「核融合研究事始め(2)」『核融合研究』第57巻第5号(1987年), 271-279頁. / 「核融合研究事始め(3)」『核融合研究』第57巻第6号(1987年), 364-378頁.
- 18) 木村一枝との私信(2015年8月21日).
- 19) 前掲1), 広重.
- 20) 西尾成子「科学史研究室」『日本大学理工学部物理学科・日本大学原子力研究所 三十五年のあゆみ』, 1993年, 104頁.
- 21) 植松英穂「科学史講座の設置」『物理学科五十周年記念 次の五十年に向かって』, 2008年, 86-88頁.
- 22) 「核融合研究資料調査会」のメンバーは以下の通り. 委員長: 西尾成子, 顧問: 山本賢三, 森茂, 関口忠, 委員: 飯吉厚夫, 板谷良平, 伊藤智之, 井上信幸, 大河千弘, 大林治夫, 川上一郎, 後藤誠一, 佐藤正知, 島本信, 田中正俊, 寺嶋由之介, 藤田順治, 宮原昭, 幹事: 植松英穂, 竹田辰興, 嶋田道也, 吉田英俊.
- 23) 前掲1), 西尾. / 社団法人プラズマ・核融合学会『核融合研究発展に関する情報収集及び調査』日本原子力研究所委託調査報告書, 1996年. / 社団法人プラズマ・核融合学会『核融合研究発展に関する情報収集及び調査』日本原子力研究所委託調査報告書, 1997年.
- 24) 前掲11), 植松, 竹田, 西尾.
- 25) E.Uematsu, T.Takeda, S.Nisio, “History of Nuclear Fusion Research in Japan,” *Historia Scientiarum*, 10(1) (2000): 16-45.
- 26) 難波忠清, 藤田順治「核融合研究アーカイブズ」『プラズマ・核融合研究学会誌』第81巻第5号(2005年), 396-397頁.

- 27) NIFS 核融合アーカイブ室ホームページ <http://www.nifs.ac.jp/archives/index.html> (2015年12月3日閲覧).
- 28) 前掲 1), 山本. / 山本賢三, 小泉興一『核融合研究開発の余録』JAERI-Review 2002-023, 2002年9月.
- 29) 前掲 1), 宮本. / 宮本健郎「核融合をめざしたプラズマの研究」『日本物理学会誌』第51巻第8号(1996年), 549-556頁.
- 30) 山中千代衛『慣性核融合研究開発史—レーザー核融合パイオニア物語—』レーザー核融合技術振興会 IFE フォーラム, 2006年.
- 31) このほか, 国内外のプラズマ・核融合研究開発史を取り使った文献や論考には, 以下のようものが挙げられる ;
- 山田雅章「核融合研究 40 年の光と影」『電気學會雑誌』第 112 巻第 11 号 (1992 年), 885-893 頁.
- John Hendry, “The scientific origins of controlled fusion technology,” *Annals of Science*, 44 (1987): 143-168.
- J. L. Bromberg, *Fusion: science, politics, and the invention of a new energy source* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1982).
- R.Herman, *Fusion The search for endless energy* (Cambridge University Press, 1990). / [邦訳] 見角鋭二訳『核融合の政治史』朝日新聞社, 1996年.
- Charles Seife, *Sun in a bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking* (Penguin Books, 2009).
- John Sheffield, *Fun in fusion research (Elsevier Insights)* (Elsevier, 2013).
- G.マクラッケン, P.ストット著, 村岡克紀, 飯吉厚夫訳『フュージョン—宇宙のエネルギー—』シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 2005年.
- ヘリガ・カーオ著, 岡本拓司監訳「制御核融合エネルギー」『20世紀物理学史』名古屋大学出版会, 2015年, 373-379頁.
- 西川恭治「大学等における核融合研究体制の変遷—核融合科学研究所設立の経緯—」『原子核研究』第45巻第4号(2000年), 71-151頁.
- 西尾成子「日本における初期の核融合研究に関する資料」『物理学史ノート』創刊号(1991年), 47-49頁.
- 寺嶋由之介「日本に於ける初期の核融合研究に関する研究資料について」『物理学史ノート』創刊号(1991年), 50-52頁.
- 竹田辰興「核融合研究の流れ」『物理学史ノート』第6号(2000年), 2-6頁.
- 川上一郎「A-B 論争について」『物理学史ノート』第6号(2000年), 7-14頁.
- プラズマ・核融合学会『プラズマ・核融合学会誌』84 特集号(核融合 50 周年記念 我が国における核融合の歴史と将来展望), 2008.
- 井口春和「核融合研究の停滞—巨費化の壁—」『[新通史]日本の科学技術』第1巻, 原書房,

2011 年, 489-511 頁.

- 32) 名古屋大学プラズマ研究所『プラズマ研究所 10 年のあゆみ』, 1972 年. /名古屋大学プラズマ研究所『プラズマ研究所 25 年史』, 1986 年. /大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所『核融合科学研究所十五年史』, 2006 年.
- 33) 原研十年史編集委員会『原研 10 年史』日本原子力研究所, 1966 年. /原研二十年史編集委員会『原研二十年史』日本原子力研究所, 1976 年. /原研三十年史編集委員会『原研三十年史』日本原子力研究所, 1986 年. /原研四十年史編集委員会『原研四十年史』日本原子力研究所, 1996 年.
- 34) 狐崎晶雄, 吉川庄一『新・核融合への挑戦 いよいよ核融合実験炉へ』講談社, 2003 年, 201-202 頁.

第2章 核融合専門部会と A-B 計画論争

1. 本章の背景と目的

日本では1950年代から60年代にかけて、多分野の研究者が熱核融合反応に関心を持ち、核融合懇談会を中心とする研究者コミュニティが構築された。その際、新しい研究分野である「核融合」を国内で取り上げるにあたり、研究者たちは未開拓な部分が多い熱核融合反応に関して、プラズマ物理学を中心とした基礎研究からスタートするという方針を立て、諸外国に追いつき追い越すことを目標に研究を開始した。ところが、1959年頃、この方針に関連した一つの論争が起こる。それが「A-B 計画論争」である。一般に、「A-B 計画論争」は次のように説明されている；

第2回ジュネーブ会議(1958)の頃、内外の研究情勢に鑑み、原子力委員会核融合専門部会では、我が国の核融合研究推進にとって重要な2つの計画路線を指摘した。(A 計画)新しい着想の育成と具体化、プラズマの基礎的研究重視。(B 計画)中型装置の建設、それによる高温プラズマ実験と技術開発。いずれの路線を進むべきかについて、研究者間の意見が分かれ、学術会議シンポジウム、核融合懇談会総会などの場での討議(A-B 論争)がなされた。1959年夏、B 計画のための次年度予算措置を要求するか否かの具体的判断を迫られた核融合専門部会では、慎重な検討の結果、最終的に要求を見送り、A 計画の先行が決まった。

「A-B 計画論争」は、1960年代半ばまで続く名古屋大学プラズマ研究所(プラズマ研)を中心とした日本の研究体制を確立する大きなきっかけとなる。そのため、このことに関しては、科学史家やプラズマ・核融合分野の研究者によって歴史の調査・分析がなされてきた。しかし、それでも未だ不明瞭な点が存在する。例えば、(1)当時、基礎研究を重視するという方針を無視して、核融合専門部会が B 計画の早期推進を決定した理由やその背景にあった考え方が挙げられる。また、(2)いつの段階から A 計画が「新しい着想の育成と具体化」ではなく、「基礎研究と研究者養成」という点が強調されるようになったのかも先行研究からは読み取れない。しかし、核融合科学研究所(NIFS)核融合アーカイブ室や名古屋大学理学部物理学教室坂田記念史料室に所蔵されている専門部会や関連する委員会の議事録、さらには学術誌に掲載された研究者の論考などを調査した結果、上述した A-B 計画論争に関わる二つの不明瞭な内容が明らかになった。本章ではこの二点の調査結果も含めた上で、「A-B 計画論争」の全体像について再考を試みたい。

先ず、「A-B 計画論争」に関する大まかな流れを把握するために、プラズマ・核融合研究開発史の先行研究で論じられている核融合専門部会と A-B 計画論争の動向を述べることにする。

核融合専門部会は原子力委員会の下部組織で、事務局は科学技術庁原子力局が務めた。同部会は、1958年5月19日から1960年7月15日まで15回にわたって開催されており、部長には湯川秀樹が選出されている。早川幸男と木村一枝は、全15回の部会を3期に分割

して、各期における議論の動向を次のようにまとめている²⁾；

第1期(第1回～第7回)：第4回専門部会までに実質的内容が形をなし、以後はそれを中間答申に仕上げることに費やされた。

第2期(第8回～第11回)：原子力予算に核融合を組入れるか否かを審議した。

第3期(第12回～第15回)：報告書をまとめる収束期。

なお、後に論争の原因となるA計画とB計画は、第4回(1958年10月27日)と第5回(1958年12月16日)の専門部会においてまとめられたもので、研究グループ(study group)として「日本独自の装置をオリジナルに考え出して設計するグループ」と「中型装置を準備するグループ」を組織し、feasibility studyに着手するという方針に基づいて、専門部会の中間答申「核融合反応の研究の進め方について」(1959年3月30日付)の中で以下のように提示された³⁾；

A 計画 新しい着想の育成と具体化

核融合の研究に関して、過去数年間に次々新しい考案が生まれて来たが、そのうちどれが終局の成功に導かれるかどうかは今なお不確定である。わが国でもいくつかの新しい着想が生まれつつあるが、それを積極的に育てて行くことが必要である。そのためには当面次の措置を講ずることが望ましい。

- (1) 大学にプラズマ科学の促進を目的とするいくつかの講座を増強し、基礎研究を進めると共に研究者の養成を行う。
- (2) 核融合研究の根本になり、特に多額の経費を要する高温プラズマ発生装置については、新しい着想の検討装置の試作を目的とする研究グループを作る。
- (3) 上記の活動でかなり有望だとわかってくれば、この研究グループを恒常化してそれを中心にして一つの研究中核を組織する。
- (4) このための予算的措置を講ずることが必要である。

B 計画 中型装置の建設

諸外国ではピンチ型、ステラレーター型、磁気鏡型等の高温プラズマ発生装置を建設し、プラズマ物理学に多くの成果をもたらした。わが国でも各研究機関で類似の小型装置を製作または設計し、高温プラズマについて様々の知識を得つつある。しかし百万度を境にしてプラズマのふるまいにかなり質的な違いが予想されるので、1千万度程度の高温を保持することを目標とする中型装置が必要である。そのためには諸外国である程度成功を見た型を参照して、中型装置をできるだけ速かに建設することが望ましい。これは3-10億円の経費が予想され、わが国としては、かなりの規模の研究になるので、効率的で総合的な方法として次のような措置を講ずるのがよいと考える。

- (1) 中型装置の形式、規模を調査研究し、その設計の具体案を作るために、中型装置設計グループを組織する。このグループは日本原子力研究所に置かれ直ちに活動を始めるのが望ましい。
- (2) このグループは、昭和34年度中に中型装置の形式規模等を選定し、さらに具体的

な検討を行うことを目標とする。

(3) 上の仕事の成果に基づき、中型装置を建設、運転、研究を行う実施機関を決める。
実施機関は、昭和 35 年度から出発できることが望ましい。

早川によると、原子力局が湯川に持ってきた答申の原案では A と B が逆になっていたので、早川が順序通りに A、B と呼ぶべきであると申し入れて、上記答申のような記述になったという⁴⁾。

ところで、本稿冒頭でも触れたが、後年にまとめられた記述の中で、A 計画は「基礎研究と研究者養成」という観点のみを強調されて論じられることがある。例えば、寺嶋由之介は『プラズマ研究所 10 年のあゆみ』の中で、A 計画を「プラズマの物理現象の解明に重点を置いた基礎研究と、研究者養成とを目指すもの」と述べている⁵⁾。また、植松英穂らの論文にも「基礎研究を重視する A 計画」⁶⁾という一文があり、吉岡齊も「プラズマに関する基礎研究の強化と、小型の高温プラズマ発生装置の試作を目指していた」ものとして A 計画を説明している⁷⁾。さらに、早川・木村論文には、A 計画は「大学を中心に実施することになるので、その体制づくりが急務とされ、中心となる共同利用研究所をつくることが考えられた」とあり、研究所構想との結びつきまでもが関連事項として挙げられていた⁸⁾。

他方、B 計画は日本原子力研究所(原研、現在の日本原子力研究開発機構の前身機関の一つ)内に創設された核融合研究委員会(通称「B 計画委」)で中型装置に関する調査・検討が行われ、同委がとりまとめた中間報告書(1959 年 6 月 22 日)は、第 8 回と第 9 回の専門部会で提示された。早川と木村の論文では、B 計画委中間報告書は次のように要約されている⁹⁾；

・・・B 計画は従来の大学等の研究、たとえば文部省の機関研究費ではまかなえないような規模のものを対象とし、「中型」の装置(予算数億円の発生装置)を速やかに作ることに意義を認めて進める。また、装置の選定条件は 1)超高温プラズマ物理の研究、装置自体の研究からも一応 100~500 万度をある程度の時間保持できるものであること、2)装置の他に測定装置、電源設備を完備し、十分に測定、実験ができるものとして、具体的には Mirror と Stellarator の 2 つの型を採り上げて設計した。

このほか、B 計画に関する説明を取り上げると、吉岡は B 計画を「当時の米・英・ソにおける核融合装置の相次ぐスケールアップに追随するためのもの」で、答申内に建設費として 3 億円から 10 億円という具体的な金額が掲げられた点を特記している¹⁰⁾。一方、植松らは B 計画を「A 計画と比較して規模の大きさの違いで提出された」と評している¹¹⁾。

その後、「核融合研究の方針に関するシンポジウム」が 1959 年 5 月 14 日に開催され、専門部会で提案された A 計画と B 計画について、特に B 計画の早期実施に対して、研究者の間で激論が交わされた¹²⁾。これが「A-B 計画論争」の本格的なはじまりとされている。なお、湯川は同シンポジウムの冒頭で A-B 計画の立案経過を報告し、1958 年 9 月にスイスのジュネーブで開催された国際連合主催の第 2 回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ会議、The Second United Nations International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy)を契機として、A 計画と併行して B 計画も遂行する必要があるとの判断が下されたと現状を説明し

た。その後、シンポジウムの席上では代表者がそれぞれの見解を述べており、宮本梧楼や山本賢三、菊池正士が B 計画の意義を主張したのに対して、早川幸男、林忠四郎、藤本陽一らは B 計画への反対意見を述べた。代表者の意見分布としては B 計画の遂行に対して賛否両意見が出されたが、この後に行われた参加者間での議論では否の意見が多く、特に専門部会での B 計画の立案手順や資金の出所等に問題があるとされた。

日本学術会議下に新設されたばかりの核融合特別委員会(融特委)と専門部会は、この時のシンポジウムでの意見分布も参考に、それぞれ今後の研究方針や体制について議論し、融特委ではプラズマ研創設へ向けて準備が進められた¹³⁾。その一方、専門部会では 1960 年度の原子力予算に B 計画の概算要求をするか判断する段階に入り、結論を出すことが求められた。ところが、第 10 回専門部会(1959 年 8 月 3 日)で本件について無記名投票を行っても、票数には優位な差が出なかった¹⁴⁾。さらに、融特委と専門部会との合同委を開催しても結論が出せなかったため、湯川は菊池正士、嵯峨根遼吉、伏見康治と相談し、結果として B 計画の先送りを英断した¹⁵⁾。このことにより、そのように決断が下されたわけではないが、「A 計画」、つまりは「基礎研究と研究者養成」に力を入れ、その中から「新しい着想の育成と具体化」を進めて行くという研究方針が事実上の結論と見なされた。その背景には、A 計画程度の小型装置による研究は各研究機関で進められているという既成事実が影響していたといえる。なお、植松らは第 4 回融特委(1959 年 8 月 2 日)で A 計画の推進を決定したと述べているが¹⁶⁾、核融合懇談会の機関誌『核融合研究』に掲載された同委の議事録には直接的に A 計画を推進することは明文化されていない¹⁷⁾。

以上が大まかな「A-B 計画論争」の流れである。これを踏まえて、次節からは「A-B 計画論争」の動向をいくつかの観点に分けて、詳述していくことにする。

2. A-B 計画立案の背景

直前にも著したように、A-B 計画は第 2 回ジュネーブ会議での各国の研究成果に基づき、専門部会で立案されたことになっている。しかし、実際にはプラズマ・核融合研究開発史の先行調査で触れられていない「A-B 計画の原案」と捉えられるいくつかの発言や提案が存在していた。本節では、専門部会内で A-B 計画が立案される以前に、両計画の原案が研究者の中で考案されていたことを示す二つの事例を取り上げる。

2.1 核融合懇談会によるアンケート

核融合専門部会は 1958(昭和 33)年 5 月 19 日に第 1 回部会が開催された。同部会はそれ以前に開催されていた核融合反応懇談会の基本的対応策に則って発足したものであり¹⁸⁾、部会長には湯川秀樹が選出され、委員は早川幸男、宮本梧楼、本多侃士、渡辺寧、岡田実、伏見康治、山本賢三、畑中武夫、嵯峨根遼吉、後藤以紀、杉本朝雄といった研究者のほか、石川一郎や法貴四郎ら科学技術庁原子力局関係者と村上成一ら文部省関係者から構成された。なお、第 7 回以降に川崎栄一、大河千弘、林忠四郎が、第 8 回以降に宮田聰が専門委員に追

加されている。

第1回から第3回までの部会では、主に研究の現状確認とそれを踏まえた上での将来計画に関して、科研費と原子力予算の問題、研究所設立についての私見など多岐にわたる議論が展開されている。そんな中で、原子力局の佐々木義武は研究所設立と科研費増額を求める研究者たちの議論の経過を踏まえて、第2回部会(1958年6月21日)で研究体制の具体的な案の提示を求めた¹⁹⁾。その結果、1958年7月22日の第3回部会で菊池によって「熱核反応推進計画の概要(菊池案)」が、また早川によって「核融合の研究計画」が提示された²⁰⁾。なお、山本は著書『核融合の40年』において、菊池案は

・・・当時、非常に貧しかった大学の研究ベースからいかにして海外の(当時いわれた戦勝国の)盛んな研究に伍するかの苦心がここににじんでいる。この考え方、計画はすぐこの後続くB計画推進案の原点とみられる

と位置づけられている²¹⁾。詳細は後述するが、菊池案にある「相当の規模の実験研究」は確かにB計画で立案された中型装置の原案と解釈することもできる。しかし、その一方で早川から提示された「核融合の研究計画」も注目に値する。第2回部会后、早川は核融合懇談会通信No.9(1958年6月24日付)²²⁾を通して、全国の研究者へ次の項目に関するアンケートをとった；

- (A) 34年度に必要な研究費：文部省の機関研究費、各個研究費等でまかなわれると前提して、現実的な必要経費を算出する。
- (B) 35年度以後の研究計画：多少夢が入るであろうが、今の段階で考えられる理想案を一応作ってみる。
- (C) 中央研究機関に関する構想：中央研究所を作ることの可否。可ならば作るべき時期等。

アンケートは全国約40グループから、さらに中央研究機関構想への意見は17の研究グループおよび個人から回答があった。なお、中央研究機関の創設について、アンケートには反対意見はなかった。早川はそれらを纏めたものを専門部会で報告している。

専門部会での報告では、早川は岡田実(阪大)の意見を骨子として、

- (I)各研究機関の関連する研究の助成、主に科研費の増額による。
- (II)形のない全国的研究所
- (III)衛星的研究所、附置研究所の形がよい。
- (IV)過渡的な中央機関
- (V)中央研究所 zero power reactor についての実験
- (VI)融合炉研究所、経済的利用価値の判定及び炉の改良

という6段階に研究の進み具合を分類し、段階的積み上げによる発展的展開を論じた。しかし、これは早川個人によるアンケート回答の要約として提示されたもので、宮本が専門部会で「早川資料は研究所の構想についてはあまりうまいまとめ方とは思えないから生のアンケートがほしい」と要望したこともあって、各グループからの研究所構想に関するアンケー

ト回答は『核融合研究』に掲載されることになる²³⁾。

その回答の中で注目すべきは、研究所を上記(I)から(VI)のどの段階で考えているかという点もさることながら、その研究所で何を行うかという記載である。特に宮本や本多ら東大理学部グループの研究所構想は、完全に A-B 計画そのものであるように見受けられる。彼らの回答では、早急に研究所を設立し、

1. 即刻大型器その他の追試を開始する。
2. 各研究機関の研究結果により、多少大きい規模の研究が必要となり、研究所で行った方がよいものをする。
3. 基礎部門を是非研究所にも置く。これは各研究機関と同格のものである。(性格は少し異なる。融合反応を目的とした基礎事項の研究である。)

という方針が述べられている²⁴⁾。さらに、上記 1, 2 と 3 について、

・・・互に助け合いつつそのまま育てるべきである。一方をつぶすことは一見経費の節約のように見えるが、非常なギャップを作ることになり、正当な将来への発展に支障をきたすことは明白である。・・・

と論じていた²⁴⁾。上記の 1 はまさに B 計画、3 は A 計画と解釈できる。

このほか、小島昌治の回答でも A-B 計画の原点と解釈できる考え方が見られる。小島は「1 日も早く中心になる機関を設け、研究の重複を避けなければならない」とし、東京大学原子核研究所(核研)と原研が中央機関の役割を果たす案を提示している。そして、核研は「新しい^{原文ママ}言理による装置に関する中央研究機関」、原研は「ゼータのような^{原文ママ}オルソドックスな装置ならびに測定に関する中央研究機関」と位置づけていた²⁵⁾。また、上記ほどではないが、神戸大学素粒子論研究室の回答も A-B 計画の原案とも捉えられなくない提案をしている²⁶⁾。神戸大素粒子論研の回答では日本の研究方針として、核融合炉を造るという目的に縛られない「個人々々の idea をのぼし、その中から何か、実りうるものを期待する」方法と「例えば万能な反応炉の構想を一応うち出して、それを素過程に分析し、その各々についての問題点あるいは Possibility を検討し、徹底的に組織的に研究を進める」、いわゆる積み上げ方式を挙げ、後者を押し進める上では核融合に専念する中央機関が必要と説いている。さらに、核融合炉を本気で造る気があるのならば、上記 2 つの研究方針を“mixed strategy”によって遂行することが必要と論じた。

このように、核融合懇談会のアンケート回答の一部には、A-B 計画の原案ともいえる研究方針が提案されていた。また、それが宮本ら東大グループのみならず、小島や神戸大からも提案されていたことは興味深い。加えて東大グループの意見だけをみれば、この A-B 計画が研究所構想とも深く関係づけられていたことは、後々のプラズマ研創設の伏線にもなっていたとも評価できる。なお、このほかにも様々な意見がアンケート回答には存在する。例えば、早川は「形のない全国的研究所」案²⁷⁾を提案しており、山本²⁸⁾や疋田強²⁹⁾らもこの意見に賛同していた。この提案は、特定の研究内容に縛られず、全国的に各専門のレベルアップを図ることを目的としている。新設された研究所が既存の研究に影響を与えることが

あってはいけないという考え方も、「形のない全国的研究所」案の背景にあったといえる。他方、早川が要約の基準とした岡田の回答は、完全なる「積み上げ方式」を主張している³⁰⁾。岡田は研究段階を4部に分け、第1部では「各大学および研究所の講座あるいは部門における核融合に関係ある研究を助成」するために研究費である科研費の増額を行い、第2部で「核融合の衛星的研究所を新設あるいは拡充する」としている。なお、岡田の中ではこの衛星的研究所は大学附置研究所としての新設もしくは研究機関の拡充によって実現されることになっている。その後、第3部において「核融合研究所を新設」するか、「あるいは核研に新部門を開設」し、基礎研究を主とするゼロ出力融合炉の実験を行って、最終段階である第4部で「融合炉研究所あるいは核融合エネルギー利用研究所を原子力研究所内あるいは別個に新設」することで、核融合炉の経済的価値の判定およびその向上の研究を遂行していくとしている。

2.2 菊池案

さて、このような核融合懇談会のアンケートが背景にあったことを鑑みれば、第3回専門部会で提示された菊池正士による「熱核反応推進計画の概要(菊池案)」³¹⁾の内容も納得ができる。もちろん、アンケートと菊池案は相互扶助を目的として立案されたものではないが、アンケートで研究所に対して反対意見が出ておらず、形式はともかく、早期の研究機関創設への賛成意見が多かった点も、また菊池案中で将来計画と研究所構想がリンクされていることもうなずける。菊池は私案冒頭で、

熱核反応の研究は国際的に見て極めて初期の段階にあり或る特定の点を押して行けば必ず成功するのであろうと云ふ突破口のメドがはっきりしていない。とは云っても全く暗中模索の状態にあるわけではなく過去数年間に行はれた各種のピンチ効果による高温プラズマの発生の実験はそれ自体数百万度の高温に達して熱核反応が起ったと信ぜられる数々の証拠があるのみならずプラズマ自身の状態について多くの未知の分野のあることが判明しつつあり、プラズマに関する物理学を追究して行くことが熱核反応による核エネルギー解放の鍵となるのではないかという希望が強くもたれている。・・・

と述べ、次のように年度ごとの計画を立案している；

33年度(第一年)：各大学並に直割試験所、研究所等で現在行われつつ、ある理論的実験的研究を極力進めて、プラズマに関する物理的性質を明かにしてその諸量の測定技術を確立する。一方科技厅の補助金により研究をすすめるある会社と大学研究者との連絡を密にしてその成果を有効に今後の推進に役立つようにする。

34年度(第二年)：文部省科研費の増額を測る。差当り三年計画とし、34年度1.5億円 35年度2億円 36年度2億円を特に熱核反応の研究にあて4乃至5のテーマを選んで実験をすすめる。本年度内に35年度以降設立さるべき研究所の計画を具体化し35年度の予算要求に提出する。

35 年度(第三年) : 2 億円の科研費によって大学に於ける研究をすすめる一方研究所を充足して相当規模の実験を開始する。

36, 37 年度(第四・五年) : 科研費による大学の研究と並行して研究所を増強してゆく。尚五ヶ年を通じ科技庁の補助金, 助成金を活用して会社に於ける関連技術の開発を推進する。

このように, 菊池案においても, 研究所構想には「相当規模の実験」が前提におかれていることが分かる。研究所の具体的な構想について, 菊池は形式を明言してはいないが, 「(イ)大学附置, 但し従来のもとは異なり大学連合の研究所が望ましい。(ロ)原子力研究所に部門を増設する。(ハ)科技庁に属する新研究所とする」という三案を挙げている。

第 3 回専門部会では, 早川によってまとめられたアンケート結果に基づく「核融合の研究計画」と菊池案をもとに, 研究方針が議論された²⁰⁾。基本的に研究者個々人の意見には相違があり, 例えば早川は方針として「国粋主義」と「敗北主義」をあげ, 国粋主義で行くならば中央研究所を創設し, 敗北主義で行くならば衛星研究所単位で小規模の研究展開が良いと論じた。一方, 岡田は自身がアンケートで回答した方針を軸として, 現段階では大学附置研究所程度で, 研究者養成に主眼を向けるべきであると主張した。これに対して, 伏見は中央研究所の早期創設には賛成だが, 「大学附置として一ヶ所に集中することは他への圧迫が生じる可能性がある」として反対している。宮本は「中心となる装置を決定できるのであれば, 中央研究所を今すぐ新設して良い」とした菊池の意見に対して, 人員の集中だけでも研究所は作れないかと提案し, 小型装置での大学の研究と併行して中央研究所を創設することに意義があり, そこには大学での研究に基づき, 「発案された良案をすぐに形に出来る場所の確保が必要である」と発言した。しかし, 菊池はこの宮本の提案について, その程度は原研で可能であるとする一方, 「科研³²⁾では研究者規模や敷地の面から核融合を研究課題するのは難しく, 科研で行うのであれば新しい研究所を創設した方が良い」と述べている。このように個々の発言を見る限りでは, アンケートで回答した私見と未知の研究課題に対する慎重さが浮き彫りとなって, 今一步決定打に欠ける状況が形成されていた。

3. 核融合専門部会で B 計画はなぜ推進されたのか?

このような背景と第 2 回ジュネーブ会議の影響を受けて, 先行研究でも述べられていた通り, 専門部会は A-B 計画を立案することになる。ところが, B 計画は国内で形成されていた基礎研究からの展開を前提とする方針に反するものであり, 多くの研究者から反対されてしまう。では何故, 専門部会は B 計画を立案し, 推進するという方針を中間答申に盛り込んだのか。本節では, 専門部会の議事録から第 2 回ジュネーブ会議の影響と B 計画推進論の展開を明らかにする。

3.1 第 2 回ジュネーブ会議の影響

第 3 回専門部会までの議論を押し進める契機となったのは, 第 2 回ジュネーブ会議であ

った。同会議には専門部会員からも湯川や石川、山田、杉本、宮本が出席し³³⁾、世界各国のプラズマ・核融合研究の成果と実情に触れる機会を得た。そして、会議後に各国の研究機関視察へ向かった宮本を除く4名は、第4回専門部会での帰朝報告において国内での研究の遅れを指摘した。報告冒頭で、湯川と杉本は以下のようなやり取りをしている³⁴⁾；

湯川：他の諸国に比し、米国がやや進んでいるように感じた。何れの方式が最も有望であるかについては、残念ながら私には判定が下せなかった。誰も判定を下すことは困難であろう。アストロンは面白いと思う。但し将来性の有無は別問題である。わが国でも、35年度頃には何らかの形で次の段階に進むべきであろう。

杉本：私の感じたことは当初の期待ほどのことなく地道にやっつけていかねばならぬ。核融合の成功は大部先のことのような印象をうけた。

湯川：たしかにゼーターの発表があつた頃の熱の上った時期にくらべると、やや冷静になってきている。

杉本：ピンチ効果によるものはロスが多く融合反応は起きないようだ。Tellerはコントロールするのに10年、経済的動力発生には更に10年と楽観的な見方をしている。

湯川：将来はコントロールできるようになるが economical になるか否かは疑問である。

杉本：各国とも国際的協調をとらえていた。

これらの報告を踏まえて行われた今後の研究の進め方についての議論では、昭和34年度の研究の重点と昭和35年度以降の見通しについて意見が出された。湯川は35年度から取り組むべき「次の段階」について、34年度中に上手く準備委員会を設置し、研究方針として「Academicなもの」と計画的な研究体制の2つが必要であろう」と提案した。これに対して、嵯峨根はグループ単位で計算を行う、つまり装置の検討を行うことは可能であるとし、早川もこれが一番有効な方法であるとした。湯川はさらに第1段階を「大きい装置をつくるための準備会」、そして第2段階として「科学技術庁を取上げて1000万円程度のものを作る」としたら良いと述べ、昭和34年度にはStudy Groupを作ることを強調し、Study Groupを受け入れる中央機関の候補として、原研、理化学研究所(理研)、核研が菊池によって提案された。そして石川、菊池、杉本、嵯峨根らが、原研が「スポンサー」、「お台所の役割」を果たすために「ノキを貸す」ことに賛同したが、早川は「原研には、大学から近^原ずか^文ない^マ人が多い」として、科研費を増やすことでStudy Groupを維持することを求めた。なお、この段階で菊池や岡田、大河は大型装置での実験に賛成したが、早川は「失敗したら後で困る」として、「Thermonuclear Reaction」といわずにプラズマ物理学の研究にしぼつたら、後でガツカリもしない」と消極的な発言をしている。

結局、Study Groupを作ることがこの段階で了解され、さらに検討したい装置の規模について、大河の「Zeta程度の2~3億orderのもの」という発言を踏まえて、湯川がStudy Groupで検討する装置は「サイクロトロン程度(3億円)を目標」とする考えを示した。この3億円程度ということが、了解を得ているかの判断は議事録からはつけられない。しかし、湯川による「Academicなもの」と計画的な研究体制の2つが必要」という見解は、A計画とB計画

の併行実施を意図するものであり、さらに「計画的な研究体制」が議論の流れの中で、B 計画的意味合いが強くなっていったことがうかがえる。しかし、湯川自身は「計画的な研究体制」の具体形については第 1 段階としての Study Group のみの早期設置を強調し、第 2 段階以降については、第 1 段階の結果を踏まえて遂行するものと捉えていた。

3.2 専門部会における B 計画推進論の展開

第 4 回専門部会で、湯川は上述した内容をまとめる方向で答申案を作るとしたが、宮本の帰朝報告を次回の専門部会で聞くこととし、方針は決定しているものの、答申案の作成は先送りとした。おそらく、湯川は第 2 回ジュネーブ会議で国内から唯一核融合に関する発表を行った宮本の意見を重視し、宮本抜きで答申案を作成することをためらったものと推察される。

1958 年 12 月 16 日の第 5 回専門部会³⁵⁾で行われた帰朝報告において、宮本は欧米諸国の研究機関を見学した印象として、「日本の実験研究はあまりにも遅々なるものだから、各国の研究がうんと強力に推進されている現在では、わが研究は停止していると云うより、むしろ後退していると云った方がよい」と評し、「理論研究も必要だが、特に実験研究を一層強力に進めなければならない」と発言した。また、私見として、ステラレータ(Stellarator)は小規模ならば理論的難点が少なく、「この型が発展し、いずれは成功する一つ型になる」とし、さらに理論がなければ実験が出来ないとは限らず、ステラレータやゼータ(ZETA)等の「有力な装置が改良され変型して行って、それらの中間的なものが成功する可能性がある」との見解を提示した。

宮本の報告を踏まえて、部会では前回議論された研究の進め方について、継続審議が行われた。その場では、先ず第 4 回部会で、

- ①現在はまだ基礎研究の段階であるので大学等の基礎研究を重視する。
- ②34 年度から大きい計画の準備をやるべきであるので study group を作って 1 年間で計画をねる。

という二点に関して意見が一致していたことが確認され、装置の型式について検討が行われることになった。なお、ここで注目すべきことは、早川が部会冒頭で「この前の部会では原研の 180 万円を増加して、ある程度のモデル実験を行えるようにするという話もあった」と発言し、また「paper plan だけに終わってしまうのは困るので、実験の可能性も残しておいてもらいたいと(前回部会で)云った筈だ」と述べており、意見が一致した二点に対して、早川も肯定的意見を持っていたことがうかがえる。しかし、その後に行われた装置の検討に入ると、早川と宮本や菊池の間で意見の相違が生じ、早川はこの計画に否定的な見解を持つようになる。

これらの一致点に関して、湯川に意見を求められた宮本は、「できるならばすでにある程度わかっている大きい装置を作ることと、全然わからないものをやる二通りのやり方が必要である」と先のアンケートと同様の意見を述べた。これに対して早川は「Copy では駄目

だ」と反対するが、菊池は「全然 Copy ではない」として宮本に賛同した。この発言後、「わかっている型のものをトレースする」という前提のもとで、中型装置の建設を念頭に議論が展開された。その際、早川は「もっと冒険的なものを考えていた」、「idea は各大学でやり始めているから新しいものをやり始めた方が進むのが早い」として最後まで Copy に反対するが、予算 3 億円から 10 億円程度の中型装置を昭和 35 年度に造ることを前提として型式を研究し、日本独自の「New idea」と、海外 Copy のトレースという意味あいでの「旧式」のそれぞれを研究するグループを作るという方針が決定的になった。

宮本が海外である程度の成功を得た Copy を中型装置として早期に建設することを提案した背景だが、第 2 回ジュネーブ会議の報告³⁶⁾において、宮本は

・・・繰り返して述べるが、決定した型式が世界のどこかで判明してから建設に着手するのでは科学・研究としての努力は手おくれである。決定以前の基礎的研究こそ最も重要であり、且つ日本で最も遅れている一部分である。特に会議のはじめに責任ある人々の云った数年後という言葉を見のがしてはならない。早急な基礎研究を熱望する。と述べ、研究方針としては「基礎研究の重視」を強調している。しかし宮本の中には、基礎研究の先の展開も考慮しておくべきだという考えがあった。そして、B 計画は A 計画によって解明されたプラズマ物理学および核融合炉としての新しい着想を「中規模の研究試作器として具体化する」際に必要となる経験を積むことを目的として、要員訓練を行うものと位置づけていたのである³⁷⁾。その根拠として宮本は、加速器研究の例を挙げて、「CERN で、25BeV 級の強収斂加速器が作られるのも、ベバトロン等の古い経験の上に、強収斂性の独創、予備実験や基礎研究があったからで、これら中型加速器の経験が如何に役立っているかを再考したい」と主張した³⁷⁾。つまり、宮本は A 計画を「(核融合研究のための)物理の基礎研究」、B 計画を「(核融合研究のための)工学・技術の基礎研究」と捉えていたのである。

1959 年 2 月 20 日に開催された第 6 回核融合専門部会では、B 計画をどの程度のテンポで進めて行くかを検討することになった³⁸⁾。この時は、直前に再び回収された核融合懇談会での Study Group に関するアンケート³⁹⁾をもとに、議論が行われた。アンケートでは、宮本が B 計画の早期実施の必要性を主張したが、ほとんどのグループが B 計画の昭和 35 年度からの実施には慎重もしくは反対の意見を述べていた。ただし、注意しなければならない点は、多数のグループは「B 計画の昭和 35 年度からの早期実施」に対して反対意見を表明しただけで、B 計画自体に反対したわけではなかった。

もちろん、早川は昭和 35 年度もさることながら、昭和 36 年度からの B 計画実施に対しても反対であった。ところが、ほとんどの専門部会員の意見は「B 計画の早期実施」に傾いていた。畑中、岡田、嵯峨根、本多、山本、川俣、さらに湯川までもが B 計画の早期実施に賛成する意見を述べている。ただし、昭和 35 年度からの実施や主体機関については慎重な意見が多く、とりあえず Study Group をつくることで意見の集約が図られた。以下に、専門部会での討論の経過を挙げる³⁸⁾；

宮本：核融合の研究がまだ基礎研究の段階であることには異存はない。理論の方は着想

を重視したいだろうが、技術の方も育成していき、いち早く外国の域に近づくことが是非必要だと思う。A計画が重要であることは言うまでもない。B計画ではわかっているものを早く強力に進めることが必要である。規模は今の10倍、ゼータクラスが適当である。B計画の装置は復(複)数にならざるを得ない。人の訓練も出来る。もし出来るならば35年度に間に合うように進めていきたい。

早川：日本の現状は悲観すべきものであった。今の力ではこわくて大きいものは出来ない。京都大学では小型装置でステラレーターに代るようなものを考えていきたい。今の計画をやっていくのも一寸苦しい。全国の学者を見ても信頼できる人は少い。会社にある装置にまかせることは危険である。京都大学では現在進めている計画に全力を注ぎB計画には35年には参加しない。

畑中：A計画についてはともかくB計画をどうすべきかは積極的には云えないが、なるべく早く中型に進むことが必要であろうと考える。

岡田：study groupを作ることに賛成。大体宮本委員の意見と同じであるがニュアンスの違いは外国に負けないためだけではなくて自分達の考えでやっていきたい。年度はきらない方がよいと思う。只このため大学関係の研究を希望します。

嵯峨根：35年に是非間に合わせることはやめて36年頃を目標にengineering sideの協力を得たい。私は今がB型のものを作る時機だと考える。原研はお世話はあるが、主導権を持つことは出来ない。B計画に対する考えは宮本、岡田両委員に似ています。違いはengineering sideの人に協力していただいて問題点をつかみたい。この点だけでもよいと考える。

本多：良心的に考えるならば早川さんの方に賛成だが、この際ある程度の勇気をもってB型の相当なものを作ることも必要であると考え。大学にそれを作ることは難しいと思う。それに専念できるところに作らねばならない。装置の使い方は徹底的に調べ上げることが責任の第一だと思う。それを全国的に批判していただく。operateするのは原研なり何なりにしていただいてそのdataを全国的にserviceする。A計画の人には絶えず何かを与えることが出来る。私はこの答申案がよいと思う。

山本：本多委員とほぼ同じである。私の経験ではゼータらしきものをやって見た。装置は予算の関係で粗末であるが、それでも学ぶところは多かった。34年35年度が予算がつき、3000万円とれてもプラズマ物理の基礎研究が出来るのがやっとなのである。大学では小型でも数年かかる。結局金と人の問題である。

川俣：B計画は多少改良された程度ですぐに進めて行くべきである。物を作るときには必ずneckがあるから何らかの成果が期待できる。電気試験所としてはB計画に賛成である。しかし手一ぱいであるのでgroupには参加できないと思う。

湯川：根本的には若干違う点もあるが、B計画を一時も早くやらねばならぬ。しかし外国に比べると悲観的である。

早川はそれでも「基礎がわからなければ中型装置は出来ぬと思う」とB計画そのものへの

批判を述べるが、嵯峨根は「作る立場の人としては色々作ることによって解ることもある。基礎、基礎と云っていは百年河清を待つに等しい。やれる積りでやらねばならない」と論じ、山本も「ゼーターの例では実験は勇敢に飛び出して来た。日本の現状では中型をやってもよい時期であろう」として、「B 計画」を検討する Study Group の創設が確実となった。そして、第 7 回専門部会(1959 年 3 月 30 日)で、答申案の文面に対して審議と加筆修正が行われ、専門部会の中間答申「核融合反応の研究の進め方について」が 1959 年 3 月 30 日付で原子力委員会に提出されることになった。

4. 研究者による B 計画への批判と解釈の変化

このように立案された A-B 計画であったが、両計画は研究者の論考や専門部会以外の委員会など様々な場所で議題として取り上げられ、激論を生むきっかけをつくる。特に問題となったのは、「B 計画の内容」や「A-B 計画の位置づけと解釈」であった。ここでは、A-B 計画が専門部会で提案されてから、研究者の間でどのように解釈されることになったのか、その変遷を追う。

4.1 A-B 計画に対する解釈の変化

もともと日本の核融合研究体制は、核融合懇談会や学術会議下の原子力問題委員会、原子核特別委員会などでも議題として取り上げられていた。その中でも、原子核特別委員会(核特委)では専門部会と関連した積極的な議論が繰り返されている。

例えば、第 3 回専門部会(1958 年 7 月 22 日)で菊池案が提示されるが、核特委でも菊池は自身の提案を説明していた。1958 年 9 月 27 日の核特委在京委員会⁴⁰⁾で、菊池は

「学術会議から文部省に 34 年度予算で、核融合研究予算を特に増額するように申入れてもらいたい。そのため核特委・力特委・原子力問題委・物研連で討論して、賛成が得られたら来る 10 月の学術会議総会に提案したい」

とし、専門部会に提出した菊池案の詳細を説明した。しかし、核特委の委員からは「核融合研究計画のアンケート」をみると実績が上がっていないし努力が足りないのではないかと、「高温発生装置より物性論が先」、「核物理の accelerator physics に対応して fusion physics が必要である」、「核融合懇談会は決定権をもたず、コントンとしている」といった意見が出された。その一方で、「物性論を調べるためにも装置がいる」、「核分裂の原子力が基礎研究とはなれて外国技術導入の方式になってしまっているのと同じ道を歩きたくない」という発言もあり、基礎研究のための研究費増額に関する措置に賛成する声もあった。このような議論の結果、核特委では「基礎研究に力を入れるべきだという原則には賛成する」が、核融合が特別の資金を必要としているかは詳しい検討がいるとし、「学術会議が核融合だけを推すことに問題がないか」等の点について、次回の核特委で取り扱うという結論が下された。

この件に関連して、資金の増額を何としても図りたかった菊池は、物理学研究連絡委員会(物研連)でも同じ提案を行った⁴¹⁾。その際、物研連でも核融合研究だけに資金を出すことは

問題という意見が大部分を占めていたが、菊池提案は「次善の策」として認められることになる。他方、時期を同じくして、核融合懇談会会長であった湯川秀樹からも、学術会議会長宛に「大学の講座の増強と研究費の増額」と「学術会議下に責任ある組織の創設」を要望する書簡(昭和33年10月15日付)が提出された⁴²⁾。その中には、今後の研究方針について懇談会で協議した結果、

- (1) 来年度も基礎研究を進め、着想の育成と具体化に力を注ぐ。
- (2) 主な研究場所を大学に置き、研究者の養成を行う。
- (3) 研究費の主な部分を文部省に期待し、講座の増強、施設の整備、機関研究費の増額を要求する。

という点が大方の意見として一致している旨が記された。

このあと、物研連での決定を受けて、核特委としての態度をどうするかを問う書簡(10月5日付)⁴³⁾が菊池から核特委委員宛に送付され、先の在京委での議論も踏まえて、10月21日の核特委⁴⁴⁾で具体的な検討が行われることになった。同委では、菊池や湯川による研究費の増額や学術会議附属の「責任ある組織」の創設に関する提案を背景として、核融合反応研究促進のための措置について、政府へ勧告する提案を学術会議第4部から学術会議総会に申入れする際に共同提案者となるかが議論された。そして、「原子力の基礎全体、更に科学全体を振興する一環として核融合をとりあげるのとなければ、核融合研究も進まない」という見方が第4部提案にはないが、湯川書簡はこの立場を取っているとして、「他の基礎科学全体とのバランスを考えるべき」であり、「一般研究者の意見を反映した合理的民主的運営ができることが望ましい」ということを提案者がはっきりと認めるならば、賛成するという態度を決定した。

このように、菊池は予算確保と基礎研究の強化を図るために、専門部会のみならず、核特委や物研連など学術会議下の委員会をも動かし、最終的にはB計画で示された中型装置を建設できる環境の地ならしをしていたと見なせる。その後、1958年10月31日に日本学術会議会長から科学技術庁長官宛で「核融合反応研究の促進について」⁴⁶⁾が勧告され、

- (1) 大学等において行われているプラズマに関する各種の基礎研究を重点的に推進する。
- (2) もう少し見当がついた時に、特にこのための研究所的なものを発足させて強力に推進する。
- (3) 現在の大学等の研究費では問題にならない。昭和34年以降、1単位数千万円程度のもので、4あるいは5は最小限必要である。

という方針が示された。

ところが、1958年10月27日の第4回専門部会、1958年12月16日の第5回専門部会を経てA-B計画が立案されると、第4部提案や湯川書簡と反するB計画の存在が問題となった。1959年1月10日の核特委⁴⁵⁾でも、当然ながら、この点が議題として挙げられた。この場でも菊池はB計画を支持して、「基礎の研究のほかに技術的問題の研究も進める必要があ

る」と述べるが、核特委は完全に B 計画反対の意見が大半を占めていた。議事録をみると、次のようなやり取りがある；

早川：熊谷，山口両氏に加速器建設の体験にもとづいて A 計画，B 計画のタイミングの問題，B 計画の後に立ち方等について意見がききたい。

熊谷：idea の base と技術の base と両方必要と思う。

早川：技術の方は B 計画のようにしてやらねばならないであろうか？両方を平行してやると A 計画の方が死んでしまう。われわれは始め A 計画だけを主張した。

山口：A 計画を推進するには B 計画の小型のものがあればよい。B 計画は A 計画中の一部であるべきだ。

最後の山口省太郎の発言は，A 計画と B 計画を段階的に関連付けたものである。専門部会が A-B 計画を立案した際，両計画は併行して遂行される前提にあり，関連性は全く無視できないが，基本的には独立したものと位置づけられていた。ところが，核特委での山口の発言は A-B 計画を独立に考えることへの批判であり，A-B 計画の解釈を変える一つのきっかけになったと考えられる。

山口の A-B 計画の関連付けについては，この後も研究者の間で同様の解釈が出され，そして専門部会においても，A-B 計画を関連付けた議論も行われている。第 5 回専門部会の後，『核融合研究』に掲載された菊池の報告⁴⁶⁾には，専門部会の議事録からは確認できない内容が存在する。その一つが，討論の結論として「study group のメンバーの人は，名古屋での超高温プラズマ発生装置の小討論会(1月19日から23日)の後で行う」という記述である。この人選を行うとされた核融合専門部会打合せ会は，1959年1月24日に名古屋大学で開催されており，川上一郎による報告⁴⁷⁾では同打合せ会での答申案に関する議論は，かなり紛糾したという。問題となった点は，数億円かかると見込まれた中型装置の設計案をどうするかということであった。もし同装置の予算を昭和35年度予算に組み入れる場合，前年6月までに装置の型式を決定する必要があるが，現段階を考慮すると，設計案としては「外国の装置の dead copy」を採用することになる。ここで，研究者間の意見には大きな隔たりがあったという。一つの意見は，菊池や宮本が力説していたように，「dead copy でもよいからすぐつくれ」というもので，「たとえ dead copy であつたにせよ，全く中型装置の経験のないわが国では，少なくとも技術上必ず得るところがある」，「データが全然とれないということもない」，「新しいアイデアが生れて来たとき，そのアイデアにもとづいて装置を設計することが今の技術水準ではすぐには出来ないであろう」という判断に基づくものであった。これに対して，「dead copy になる位ならもう一年のばしたらどうか」という意見も主張された。この意見の前提には，装置を以下の4つの型に分類するという考えがあった⁴⁹⁾；

A 型 10^6 K の order のプラズマ発生装置で， 10^7 円の order の予算(現在各研究グループでつくられているもの)

B 型 10^7 K の order のプラズマ発生装置で， 10^8 円の order の予算(いわゆる中型)

C 型 Zero Power Fusion reactor

D 型 positive power reactor etc.

そして、もし B 型装置の一つとして B1 が出来たとすれば、他の B 型装置 B2, B3・・・は当然建設が遅れることになり、B1 が dead copy となると、遅れが重大な問題になってしまふ。さらに、C 型が出来るまでに B 型の装置をいくつ造れば良いかが分からない現状では、数億円の金を使うのは慎重でなければならないと考えられた。それに加えて、

型(Zeta型とかStellarator型とか)がちがうと技術もちがうであろうから B1 として dead copy をつくるのは技術的にも必ずしもよいとは言えない。それよりも、一年のばして検討する(検討開始はすぐとしても)か、又はもつとのばして今各大学につくられつつある装置のどれかを大型化するか、又は新しいアイデアをもとにしたものを小型(A)からつくるかした方がよい。・・・

との見解も根拠となっていた。川上の記録に記載はないが、おそらくこの意見を強く主張したのは早川であったと思われる。このように、専門部会打合せ会でも A 計画と B 計画は関連づけられ、さらにはその先の C, D までもが一連の段階として考えられるようになっていった。なお、この解釈は核融合懇談会のアンケートで岡田が提案した「積み上げ方式」と同等であると見なすことができる。さらに、B 計画で提唱された中型装置を宮本のように「工学技術の基礎研究」としてではなく、「核融合発電への一段階」と解釈する結果であった。結局、B 計画の捉え方はその立案直後から、研究者の中で全く異なる意味合いで解釈されてしまったのである。

4.2 研究者による核融合専門部会と B 計画への批判

このような解釈の違いも含めて B 計画の内容に対しては、批判的な意見を述べた論考が多数出された。特に早川も所属する素粒子論グループとその出身者によって、学術誌上で徹底的な批判が加えられた。

素粒子論グループの中でも藤本陽一、武田暁、福田信之、梅沢博臣による武蔵野グループは、A-B 計画論争前から、第 2 回ジュネーブ会議の結果を踏まえて、核融合の研究方針として「手足をもたない上からの方式」よりも、「積み上げ方式」が核融合研究の近道であると論じていた⁴⁸⁾。そして、「研究者側の自主的なグループ育成」と「研究現状に対する学問的判断」、「総合的研究体制を考える場所を作ること」が望まれるとともに、政府側では当分の間、「紐のつかない豊富な研究費を研究者に与える雅量」と「研究者と実質的に研究段階の分析をしながら研究計画を立て、全般的な原子力研究費の配分を考え得る機構」の創設を要望していた。そのため、彼らは B 計画の説明で「外国である程度成功をみた高温プラズマ発生装置」としている点について、原子炉のように原理が分っていて、実用化可能な段階にないにも関わらず、外国の装置を導入することを問題視した⁴⁹⁾。また、「現在提出されている B 計画案は、融合反応の B 計画とみなすべきでなく、むしろ放電工学の B 計画である」と評した⁴⁹⁾。また、原子力予算の使用についても慎重さを求めており、巨額の研究費を使用する場合でも核融合研究の一分野だけに原子力予算を含めると、「原子力の基礎科学

の間のバランスをくずすこと以外の何物でもない」として批判した。

このほか、広重徹も B 計画に対して、否定的な見解を表明している⁵⁰⁾。広重は宮本による第 2 回ジュネーブ会議と各国視察が専門部会での結論の根拠であるとし、この結論に対して不安な点を挙げている。彼は

現在は、何かある着想にもと^原ず^文いた^マ装置を考案し、それを改良・大型化してゆけば核融合の利用が成功するという段階にはほど遠く、プラズマ物理の確立ということに主眼をおいた、体系的、多面的な研究を展開しなければならない段階である。・・・

とし、「日本もアイデアだけはひけをとらない。金さえ出せばすぐにも実現できそうだ」というような段階ではない」と評した。また、A-B 計画について「基礎研究から実用化までの全体の手順を立て、各段階で解明すべき問題の性質に応じて、装置の種類や規模を検討したうえでのものではない」と非難した。そして、専門部会は原子力委員会が天下りに作った組織であり、研究者の自主的な研究の発展を妨げるものと批判している。さらに、菊池による核特委での提案についても、原子力予算でないとは多額の経費を賄えないとする考え方は、「意地の悪い見方をすれば、これは地歩の拡大をはかる原子力委員会が、核融合ブームを醸成するためにうった芝居に、学術会議がのせられたものといえよう」として、研究者側からの自発的意思によるものではないと論じた。そして、広重はこれら一連の動きに一貫して見られるのは、「原子力委員会ないし科学技術庁原子力局の、あらゆるチャンスをとらえて、科学・技術のあらゆる分野に主導権を確立してゆこうとする姿勢」であり、国民の監視と科学者の自覚の必要性を説いている。

他方、佐藤正知と川上一郎も B 計画に対する批判を述べている⁵¹⁾。佐藤と川上は、菊池の提案に関しては核融合懇談会を中心とする大多数の研究者の意見「核融合は基礎研究の段階である」と一致しているとし、広重のような非難はしていないが、その後の専門部会による A-B 計画の立案については批判を加えている。佐藤と川上は、B 計画のみならず、A 計画の「新しい着想の育成と具体化」という点も批判していて、新しい着想は研究の積み重ねによって成り立つものであり、さらに大学研究の充実を骨子とする A 計画は、「事実上、少数の人々だけによる B 計画だけを推進するための煙幕の役割を果すことにもなりかねない」と酷評した。一方で、B 計画においても、彼らは宮本によって主張された装置を造る目的が「高温プラズマ実験とは別の目的(技術的訓練)」であることを問題であるとし、装置の検討よりも先に計画が立案されたこと、さらに「実際に中型装置建設に参加している研究者の一部の考え方と、答申案との間にかなりニュアンスのズレ」があることを指摘した。このほか、多額の費用を必要とする核融合研究だけに原子力予算を用いてしまうと、他分野で費用の増額が見込まれる場合に文部省予算から切り離されてしまい、基礎科学全体に混乱を及ぼす可能性があるとして危機感を抱いている。その上で、佐藤と川上は B 計画を核融合懇談会に戻し、研究者による自由な参加のもとで装置を設計し、「筋の通った文部省予算」で研究を遂行すべきであると提案した。

このように、専門部会への懐疑とそこでの計画立案の経過、さらには原子力予算を基礎研

究へ使用することへの反対が B 計画に対する主な批判点であった。また、『核融合研究』に掲載された専門部会の記録のみを根拠として、B 計画の推進を主張した菊池と宮本に対して、集中的に批判が向けられていた。

5. 専門部会での B 計画推進に対する捉え方の変化

「核融合研究の方針に関するシンポジウム」の翌日(5月15日)に開催された第8回専門部会⁵²⁾では、B 計画委による第1次中間報告が行われた。なお、B 計画委の第1回会合(1959年5月1日)において、B 計画は「勿論基礎研究の段階である」ことや装置は複数台考えられることも確認されていた⁵³⁾。その上で作成された第1次中間報告では、ステラレータ型およびミラー型(イオンサイクロトロンレゾナンス方式)の演習設計について報告が行われている。ところが、新たに専門部会委員となった林忠四郎や川崎栄一は、同報告に対して装置の型式を選定した理由が不明確な点を指摘し、研究目標を設定した上での型式を選ぶべきであると批判した。これに対して、菊池は仮に装置自体が駄目になったとしても、その経験は無駄にはならないとし、大河も外国に追いつくためという特殊事情からすれば B 計画委立案の装置を造ることに賛同した。しかし、早川は B 計画委案が大学でやっているものを一寸大きくなったものに過ぎないと述べ、嵯峨根も「案が concrete でないとすればもう一年延ばすということが考えられる」と発言した。また、伏見も A 計画が登り坂にある現状では、差し当って諸外国の研究調査などに力を入れるべきであると主張したほか、宮本までもが「B のために A が圧迫されることを心配する。昨日学術会議でも話が出たが今までの経験により大学の人々が心配している」と述べるなど、専門部会内でも B 計画の早期遂行には暗雲が立ち込め始めた。

そして、B 計画の位置づけが決定的に変更される出来事が起こった。それは第9回専門部会(1959年6月22日)で、新設された融特委の委員長に就任した伏見から、融特委の意見として次の3点が報告されたことに起因する⁵⁴⁾；

- (1) A 計画と B 計画の関連は切りはなされていたが、B 計画は A 計画の発展したものであり、大学で A 計画をやっている人の意欲のうえにのつて B 計画をやってほしい。
- (2) 計画を進めるに当って手順をふんで全研究者の考えを総合していただきたい。出来るだけ手順をふんで後をしつかり進めたい。
- (3) B 計画を含めて核融合は基礎研究の段階にあるので、出来れば文部省でやっていきたい。

選挙によって選ばれた研究者から構成される融特委からの提案に対して、専門部会としても従わざるを得ない状況が形成されつつあったといえる。しかし、その一方で、湯川は「答申案に対して大部抵抗があつたが現在は抵抗が薄れてこれをもり立てて行こうというところに来たと考えられている」と述べて、大半の研究者が段階的手順を踏む形にすれば、B 計画自体には反対ではないことが強調された。また、早川も融特委では「B の段階を通り過ぎれば原子力予算で後をやっていくという結論であつた」と発言し、将来の原子力予算使用に

関して研究者が反対していないことも報告された。しかし、それは B 計画の本意とは反するもので、宮本や大河、さらに渡辺、宮田が B 計画の早期実施の必要性をあらためて主張するが、当初 B 計画に賛同していた本多は、昭和 35 年度の実施が A 計画へのストレスになると困るので、広く研究者の意向を汲んで進めるべきであるとして、早期実施への慎重な判断を求めた。また文部省の村上も「A 計画が無統制に出てきても困る。A を含めて B 計画を考えていただきたい」と発言し、当初の B 計画は徐々に方向性を変えざるを得ない状況になっていった。

他方、融特委では核融合懇談会(1959 年 7 月 10 日～11 日)⁵⁵⁾で取り上げられた研究体制について、東北(長尾)、森、川崎、京大(宇尾・林)から提案された四案を踏まえて、研究の進め方に関する検討が行われ、第 4 回融特委(1959 年 8 月 2 日)において次のような結論が下された⁵⁶⁾。融特委としては文部省を中心とする方針を取るが、川崎が提案したプラズマ科学研究所(仮称)の創設と同研究所で行う中型装置の計画について、A 計画を育てて出来るだけオリジナルな方向でやっていくか、B 計画としてコピーでも良いから作って製作技術の養成や高温プラズマの研究を行っていくかは未確定であるため、文部省予算での実現性を検討する「プラズマ科学研究所(仮称)設立準備小委員会」を創設する。その一方、科学技術庁については A 計画程度の研究が電気試験所などで実施されているので、実質的には文部省に影響を及ぼさないが、B 計画規模のものは文部省予算を妨害する可能性があるため、少なくとも 1 年間延期する。

このような研究者(核融合懇談会)の意見を踏まえ、さらに A-B 計画を積み上げ方式として盛り込んだ案を融特委が策定したことによって、専門部会では原子力予算を用いて早期に B 計画を実施するかという点に関する最後の攻防が始まった。1959 年 8 月 3 日に開催された第 10 回専門部会⁵⁷⁾では、B 計画委の第一次設計報告が行われるが、研究体制の問題がはっきりしないと二次設計に進められないとして早々に研究体制のあり方についての検討へと議題が移された。B 計画に原子力予算を使うことに関して宮本や菊池、山本、大河は賛成し、宮田も文部省予算、原子力予算どちらでも良いからある程度大きなものをやる必要性を力説した。その一方で、早川は「全部日本でやろうとする気分があるがそれほど野心をもたない」とし、「日本にあった小さい仕事をやり仕事を充実させる」ことを要望した。このような收拾がつかない状況を踏まえて、嵯峨根は原子力局と文部省の両方から概算要求を提出し、12 月までにどちらかに決めるか、またはもう一年待つことを提案するが、湯川は概算要求を提出した場合に問題が生じてしまう危険性を危惧し、融特委との合同委員会を開くべきと発言し、嵯峨根もこれに賛同した。しかし菊池は原子力予算に概算要求を暫定的に出して、融特委との話し合いの後で本予算とするか撤回するかを決定することを発案し、この提案に対して部会員による投票が行われることになった。投票の結果、票数は賛成 6 票、反対 5 票、白票 1 票となり、賛否の票数には優位な差が生じなかった。そのため、湯川はこの件は非常に重要なことであるため、融特委との合同委員会で了解を得たいとして、結論は先送りとなった。

その後、8月10日に第11回専門部会と第5回融特委の合同委員会が開かれたが、そこで議論は、B計画の予算を原子力予算に計上するか否かに終始され、この時も意見の完全な一致には至らなかった⁵⁸⁾。その際、融特委としては既にプラズマ科学研究所(仮称)の創設に向けた方針に関する結論を出しているため、原子力予算への計上に関しては専門部会に一任するとの方針が取られた。そして、湯川は菊池、嵯峨根、伏見と相談し、8月13日付の専門部会員宛への書簡の中で、「昭和35年度原子力予算へのB計画予算の計上を見送る」という湯川裁定を下すことを伝え、B計画を原子力予算のもとで1960(昭和35)年度から遂行することはなくなった⁵⁹⁾。

6. 本章のまとめ

この後、第12回から第15回の専門部会では、融特委でのプラズマ研創設に向けての経過報告と報告書の作成作業が中心となった。その中でも、B計画支持派はプラズマ研内でも技術面の養成を要望し、何とかB計画の哲学を残すことに尽力している⁶⁰⁾。その結果、1960年7月5日付で出された専門部会の報告書案⁶¹⁾ならびに1960年10月5日に提出された報告書「核融合反応の研究の進め方について」⁶²⁾に、B計画はそのままの形では実現されることはなくなったが、「プラズマ研究所の計画の中に、違った形で生かされてゆくことが期待される」という一文が記載されることになった。他方、同報告書案ではA計画を次のように述べている；

A計画は、30年頃から大学、国立試験研究機関等で行われてきた研究を更に進め、特にプラズマに関する物理的諸現象を解明することに重点を置く。そのために研究設備を充実し、大学にプラズマ科学に関する学科講座を新設し、基礎研究を進めると共に研究者の養成を行う。

ここには、中間答申で出された「新しい着想の育成と具体化」という観点は完全に削除され、後年に述べられているような「基礎研究と研究者養成」に主眼が置かれていた。このように、B計画のみならず、A計画までもが専門部会での立案後、研究者によって解釈が変えられ、結果として専門部会もそれを受け入れざるを得なくなっていった。

なお、注視すべき点として、B計画に対する専門部会内での議論が挙げられる。B計画を専門部会が立案したことについて、多くの研究者が基礎研究を重視するとしたそれまでの方針を無視したものとして酷評した。しかし、専門部会でB計画に反対したのは早川のみで、湯川ですら当初はB計画に賛成していた。

ところが、こういった専門部会の見解は議事録が非公開であったために、研究者には専門部会で何故A-B計画が立案されるに至ったのかが正しく伝わらず、さらに原子力委員会の下部組織である専門部会への疑心も影響して、否定的な意見が大勢を占める結果となった。特に、早くから核融合研究に関心を持った研究者が多かった素粒子論グループでは、原子炉の国内導入時の苦い経験を踏まえて、核融合分野に関しては研究者が主導をとり、基礎研究からの積み上げ方式の重要性を主張した。そのため、素粒子論グループ所属の研究者はA-

B 計画に対して徹底的な批判を加えることになり、結果として B 計画支持派との間で「A-B 計画論争」が生じるようになった。

その一方、専門部会では B 計画委が創設され、具体的な議論が始まる。ところが、B 計画委が立案した中型装置は装置設計の目的が不明瞭であったため、当初 B 計画に賛成していた部会員も早期実施に対して躊躇する動きが大きくなっていった。そこに融特委からの A 計画と B 計画の関連付けを要望する意見が相俟って、B 計画に対する湯川裁定へと繋がることになった。また、A 計画についても、積み上げ方式を取る上では「新しい着想」は研究の積み重ねの上に成り立つものであるとされ、最終的には専門部会報告書にある「基礎研究と研究者養成」として、研究者間でのコンセンサスが形成されることになったのである。このような結果として、B 計画は先送りとなり、A 計画のみが国内で遂行されたと捉えられた。さらに、B 計画については嵯峨根が後年に述べたとされている「お墨付き」によって、1966 年の原子力開発利用長期計画として復活したと解釈されたのである⁶³⁾。しかし、ここで言う A-B 計画は専門部会が当初立案したものではなく、A-B 計画論争の結果として改定された A-B 計画であった点に注意する必要があるだろう。

以上の総括として、本章冒頭で述べた「A-B 計画論争」に関する二つの不明瞭な点に関してまとめると、次のようになる。

- (1) B 計画提案の背景にあったものは、第 2 回ジュネーブ会議での国際的情勢に加えて、核融合懇談会が行ったアンケートでの東大グループなどの回答や「菊池案」の存在であった。換言すれば、B 計画は「第 2 回ジュネーブ会議」というあからさまな海外情勢だけではなく、国内での議論を契機として発案されたものであり、実験家(特に宮本)による「工学分野の基礎研究」としての位置づけを有するものであった。しかし、研究計画を発展段階論的に考え、基礎研究からの積み重ねを主張する多くの研究者の賛同を得ることは出来なかった。つまり、B 計画は「基礎研究」と解釈されなかったのである。
- (2) 一方、A 計画は「新しい着想の育成と具体化」として、B 計画との併行路線が採用されることが専門部会の前提にはあった。そこには、単に基礎研究と研究者の養成だけを行うのではなく、諸外国に追いつき追い越すという観点から、日本独自のプラズマ閉じ込めに関する「新しい着想」が提案される土壌をつくる必要があるとされていた。しかし、佐藤と川上の論考にある「新しい着想は研究の積み重ねによって成り立つもの」という評価に代表されるように、この考え方も発展段階論的な積み重ねを前提とする考え方には馴染まず、最終的な専門部会報告書では「基礎研究と研究者養成」として取り扱われる結果となった。これを根拠として、1961 年に創設されたプラズマ研は「基礎研究と研究者養成」が研究方針として位置づけられることになった。

ところで専門部会で立案された A-B 計画は、結果として発案当初から研究所構想とも密接に関係していたといえ、プラズマ研は「A 計画の受け皿」になっていたと解釈されている点とも関連性がうかがえる。その一方で、B 計画も研究所構想とも結び付きがあったと捉えられる。現に、第 3 回融特委(1959 年 7 月 11 日)で川崎がプラズマ科学研究所(仮称)につい

て提案した際に、「今考えられているような B 計画は、その中に含めて考えて行ったらどうか」と発言しており⁶⁴⁾、プラズマ研は「B 計画の受け皿」としても評価できる可能性がある。この点に関しては、例えばプラズマ研での QP 装置建設の動向も踏まえて再考する必要があり、今後の課題としたい。

文献と注釈

- 1) 「用語解説」『プラズマ・核融合学会誌』第 84 巻増刊「我が国における核融合研究の歴史と将来展望」(2008 年), 98 頁.
- 2) 早川幸男, 木村一枝「核融合研究事始め(1)」『核融合研究』第 57 巻第 4 号 (1987 年), 204-206 頁.
- 3) 「核融合反応の研究の進め方について(昭和 34 年 3 月 30 日付)」前掲 2), 210-211 頁.
- 4) 前掲 2), 205 頁.
- 5) 寺嶋由之介「懇談会からはじめて」『プラズマ研究所 10 年のあゆみ』, 1972 年, 20-24 頁 (特に 21 頁).
- 6) 植松英穂, 竹田辰興, 西尾成子「日本における核融合研究開発の歴史」『日本物理学会誌』第 56 巻第 6 号 (2001 年), 395-402 頁(特に 396 頁).
- 7) 吉岡斉「大学系の核融合研究」, 中山茂他編集『[通史]日本の科学技術 第 3 巻』学陽書房, 1995 年, 133-145 頁(特に 134 頁).
- 8) 前掲 2), 205 頁.
- 9) 前掲 2), 205 頁.
- 10) 前掲 7), 396 頁.
- 11) 植松英穂, 竹田辰興, 小島智恵子, 西尾成子「B 計画の見送りとその後」『日本物理学会講演概要集』第 58 巻第 1-2 号 (2003 年), 380 頁.
- 12) 日本学術会議原子力問題委員会・核融合特別委員会「核融合の研究体制に関するシンポジウム」, 社団法人プラズマ・核融合学会『核融合研究発展に関する情報収集及び調査 委託調査報告書』, 1997 年, 149-162 頁.
- 13) 名古屋大学プラズマ研究所『プラズマ研究所 25 年史』, 1986 年, 11-14 頁.
- 14) 川上一郎「A-B 論争について」『物理学史ノート』第 6 号 (2000 年), 7-14 頁(特に 13 頁).
- 15) 前掲 14), 14 頁.
- 16) 前掲 6), 396 頁.
- 17) 「核融合特別委員会(第 4 回)議事録」『核融合研究』第 3 巻第 3 号 (1959 年), 330-339 頁.
- 18) 山本賢三『核融合の 40 年—日本が進めた巨大科学—』ERC 出版, 1997 年, 28 頁.
- 19) 「第 2 回核融合専門部会議事録」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-02).
- 20) 「第 3 回核融合専門部会議事録」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-03).

- 21) 前掲 18), 30-31 頁.
- 22) 「核融合懇談会通信 No.9 1958.6.24」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-13-05).
- 23) 早川幸男「核融合の研究計画」のアンケート『核融合研究』第 1 巻第 2 号 (1958 年), 71-109 頁.
- 24) 本多侃士, 平田森三, 玉河元, 今井功, 宮本梧楼, 木原太郎「融合反応研究所」前掲 23), 98-99 頁.
- 25) 小島昌治「中央研究機関に関する構想」前掲 23), 100 頁.
- 26) 神戸大学素粒子論研究室「中央研究所について」前掲 23), 105-106 頁.
- 27) 早川幸男「核融合研究の中央機関について」前掲 23), 104-105 頁.
- 28) 山本賢三「核融合研究の中央機関」前掲 23), 100-101 頁.
- 29) 疋田強「中央研究機関についての感想」前掲 23), 100 頁.
- 30) 岡田実「核融合研究体制私案」前掲 23), 107-108 頁.
- 31) 菊池正士「熱核反応推進計画の概要」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-04-07).
- 32) この部分の「科研」が「科学研究費」と「株式会社科学研究所」のどちらを示しているのかは, 明確には判断できない. なお, 後者のことを指しているとする, 1958 年には「理化学研究所法」制定に基づき, 科研は「特殊法人理学研究所」として新たに発足しており, 第 3 回専門部会(1958 年 7 月 22 日)の時点では既に理研になっていたと思われる.
- 33) 『第 2 回国際連合原子力平和利用国際会議日本政府代表団報告(国科資第 19 号)』, 昭和 34(1959)年 7 月, 外務省, 19-20 頁.
- 34) 「第 4 回核融合専門部会議事録」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-04).
- 35) 「第 5 回核融合専門部会議事録」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-05).
- 36) 宮本梧楼「3 核融合反応関係(付, 核物理学実験部門)」前掲 33), 47-49 頁.
- 37) 宮本梧楼「私はこう考える 34.2.7」『核融合研究』第 2 巻第 3 号 (1959 年), 303-305 頁.
／NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:401-04-08).
- 38) 「第 6 回核融合専門部会議事録」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-06).
- 39) 「研究体制についての意見」『核融合研究』第 2 巻第 3 号 (1959 年), 303-316 頁.
- 40) 「原子核特別委員会在京委員会議事録(1958 年 9 月 27 日)」, 坂田記念史料室史料 (UnitID:A-2-2-1-2-9).
- 41) 「原子核特別委員会議事録(1958 年 10 月 21 日)」, 坂田記念史料室史料(UnitID: A-2-2-1-2-12).
- 42) 「学術会議への申し入れ書 核融合懇談会会長湯川秀樹→日本学術会議会長兼重寛九郎宛(昭和 33 年 10 月 15 日)」, 前掲 2), 211-212 頁.
- 43) 「意見聴取 原子核研究所研究長菊池正士より原子核特別委員会委員宛(昭和 33 年 10 月 9 日)」, 坂田記念史料室史料(UnitID:A-2-2-1-2-10).
- 44) 「核融合反応研究の促進について(勧告)」昭和 33(1958)年 10 月 31 日付・庶発第 716 号, 日本学術会議 25 年史普及版編集委員会『日本学術会議 25 年史』, 1977 年, 98 頁.

- 45) 「原子核特別委員会議事録(1959年1月10日)」, 坂田記念史料室史料(UnitID:A-2-2-1-4-03).
- 46) 菊池正士「専門部会より」『核融合研究』第2巻第1号(1959年), 12-13頁.
- 47) 川上一郎「核融合専門部会打合せ会より(附答申案)」『核融合研究』第2巻第2号(1959年), 173-178頁.
- 48) 素粒子論武蔵野グループ「核融合反応研究の諸問題」『科学』第29巻第1号(1959年), 14-18頁.
- 49) 前掲12), 158-159頁(藤本陽一の発言).
- 50) 広重徹「核融合研究体制への危惧—前者の轍を踏むなかれ!—」『自然』第14号第3号(1959年), 28-29頁.
- 51) 佐藤正知, 川上一郎「核融合研究の問題点—科学技術の新事態への認識—」『自然』第14巻第8号(1959年), 8-13頁.
- 52) 「第8回核融合専門部会議事録」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-08).
- 53) 山本賢三, 森茂「第1回B計画研究会報告」『核融合研究』第2巻第5号(1959年), 498-500頁(特に498頁).
- 54) 「第9回核融合専門部会議事録」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-09).
- 55) 「核融合懇談会報告」『核融合研究』第3巻第2号(1959年), 224-230頁.
- 56) 前掲17), 334-335頁.
- 57) 「第10回核融合専門部会議事録」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-10).
- 58) 「核融合特別委員会(第5回)議事録(核融合専門部会との合同会議)」『核融合研究』第3巻第3号(1959年), 350-351頁. /NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:401-23-32).
- 59) 「湯川秀樹→核融合専門部員宛書簡(昭和34年8月13日付)」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:401-04-11).
- 60) 例えば, 第13回専門部会で宮本や山本はプラズマ研究所での技術面の養成も要望している:「第13回核融合専門部会議事録」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:301-01-15).
- 61) 「核融合専門部会報告書案 昭和35年7月5日」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:401-04-07).
- 62) 「核融合反応の研究の進め方について(昭和35年10月5日付)」前掲2), 212-214頁.
- 63) 前掲18), 96-97頁.
- 64) 「核融合特別委員会(第3回)議事録」『核融合研究』第3巻第2号(1959年), 209-224(特に217-218頁).

第3章 日本原子力研究所・電気試験所・理化学研究所における 核融合研究黎明期の歴史

1. 本章の背景と目的

第1章でも述べたように、核融合反応の平和利用に関する研究は1955年8月にジュネーブで開催された第1回原子力平和利用国際会議(The First United Nations Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 第1回ジュネーブ会議)でのバーバ発言から、既に半世紀以上が経過した。現在は、国際熱核融合実験炉 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)に代表される国際協力などを通して、研究成果を蓄積している段階にあるといわれている。

核融合研究が各国で機密事項から外された1950年代中頃、研究者たちは核融合炉の実現を安易に考えていたという¹⁾。すぐさま、ソ連や米国の研究者によって「磁気びん」でのプラズマ閉じ込めの方法が考案され、多くの実験装置が建造された。米国のスピッツァー L.Spitzer による指揮のもとでプリンストン(Princeton)大学に建造された Stellarator(ステラレータ)、ソ連クルチャトフ(Kurchatov)研究所の Ogra(オグラ)、英国ハーウェル(Harwell)研究所の ZETA(ゼータ)などの装置がこれに該当する。ところが、Stellarator で確認されたボーム(Bohm)拡散に代表されるように、磁気びんでの閉じ込め(磁場閉じ込め核融合)の方法でプラズマを長時間閉じ込めておくことは当初の予想よりも困難を極め、実験はすぐさま暗礁に乗り上げることになった。そのため、1950年代末には世界的な核融合研究の趨勢が、ZETA や Stellarator などの「中型・大型装置によるプラズマ閉じ込め」から「小型装置を用いたプラズマ物理学」へと、その目的を転換する。しかし1960年代に入ると、米国ジェネラル・アトミック(General Atomic, GA 社)の大河千弘やプリンストン大学プラズマ物理学研究所(Princeton Plasma Physics Laboratory, PPPL)の吉川庄一によって、内部導体系装置による平均極小磁場配位での異常拡散の抑制効果が実験的に実証され、さらにソ連のアルティモビッチ L.A.Artsimovich 率いるクルチャトフ研究所グループが、装置 Tokamak(トカマク)でボーム拡散時間を超える閉じ込め時間を実現したことなどにより、徐々に中・大型装置による閉じ込め研究がその活路を見出していった。その後1970年代後半になると、日本や米国、欧州を中心として、3大トカマクに代表されるような大型装置による実験が開始され、さらに INTOR(International Tokamak Reactor)計画や ITER など世界的な共同研究としての実験炉計画が立案されるようになっていった²⁾。

一方、日本の核融合研究は1960年代から本格的に始まった。旧文部省傘下としては各大学に加えて、1961年に名古屋大学プラズマ研究所(プラズマ研)が創設され、主として小型装置によるプラズマ研究が遂行された。これに対して、旧科学技術庁管轄の研究機関である日本原子力研究所(以下「原研」、後の日本原子力研究開発機構)や理化学研究所(以下「理研」)、また旧通商産業省工業技術院管轄にあった電気試験所(以下「電試」、後の電子技術総合研究所(「電総研」))で、現在の産業技術総合研究所(「産総研」))などにおいても、プラズマ研設

立と同時期に核融合に関する研究が開始された。その後、同 3 研は 1968 年 7 月 4 日に原子力委員会が定めた「核融合研究開発基本計画」に基づく研究開発の実施機関として指定され、日本の核融合研究は文部省と科技庁による「二元的科学研究行政」²⁾が本格的に取られることになる。

なお、これまでに行われてきた我が国の核融合研究開発の歴史調査において、上述した 3 機関は「核融合研究開発基本計画」以降の展開、その中でも、同計画の中心的役割を担った日本原子力研究所(原研)における実験計画の変遷が研究対象として取り扱われてきた³⁾。そのため、1950 年代半ばから 60 年代の核融合研究黎明期における原研・電試・理研の研究については、各研究機関が発刊する研究所年史以外に、詳細に内容を論じた先行研究がほぼ存在しないといえる。

本章では原研、電試、理研における核融合研究開発史、特に 1950 年代から 1960 年代にかけての 3 研における核融合研究開始の経緯と動向を論じ、さらに同時期の各機関での研究と「核融合研究開発基本計画」の関連性について言及する。

2. 原研における核融合研究黎明期の歴史

2.1 原研における核融合研究の起源⁴⁾

原研において、核融合に関する実験的研究が始まったのは 1961(昭和 36)年である。しかし、原研所属の研究者が核融合研究に対する関心を持ち始めたのは、第 2 回ジュネーブ会議が開催された 1958 年頃からであった。現に『原研 10 年史』⁵⁾を見ると、同年から「核融合研究の予備的研究が始められた」と記述されている。ところがその反面、第 2 回ジュネーブ会議の報告を記した JAERI-memo⁶⁾では、核融合研究に関する同会議での発表が全く触れられていなかったことから、1950 年代の原研内において、核融合研究は未だ公式のものではなかったと判断できる。この段階において、核融合研究に関心を持った原研所員は少なくとも原子炉開発部に所属していた笹倉浩、田中正俊、吉川庄一の 3 名で、具体的な核融合研究に関する知識や関心は、東大宮本梧楼研究室出身の吉川を通じて聞き及んだものと考えられる。宮本研との関係については、1959 年頃に起こった「A-B 計画論争」の時に、笹倉と田中が宮本研と共同でステラレータ型装置に関する理論的な検討作業を行っていることからうかがえる⁷⁾。なお、吉川は原研に所属後、ほとんど期間を置かずに、「カナダ・カップ留学基金」による原子力留学生としてマサチューセッツ工科大学(Massachusetts Institute of Technology, MIT)に移ってしまうが、当時の読売新聞⁸⁾や『日本原子力研究所年報』⁹⁾によると、吉川の渡米目的には「原研における核融合研究開始に際しての情報収集」も含まれており、核融合研究に対する関心は原研内で着実に高まりつつあった。

2.2 原研における核融合研究のはじまり

2.2.1 プラズマ・ガンによる研究

1960(昭和 35)年になると、開発室において「核融合」が研究課題として取り上げられた。

後に原研・核融合研究班のリーダーとなる森茂は、同時期に東京大学理学部助手と兼任の形で、非常勤所員として原研に着任する¹⁰⁾。原研に着任した経緯について、森は「核融合は原子力の一環として考える必要があり、大きなことを行う場合には大学の枠には入らないという考えが背景にあった」と回想している¹¹⁾。

当初、原研内で核融合に関する研究課題として取り上げられたのは、PIG プラズマによる加熱実験であった。ところが 1960 年 12 月に入って、創設予定のプラズマ研が PIG 放電による加熱を研究テーマとして取り上げるようになったため、原研では急遽 PIG プラズマによる研究計画は取り下げられ、代わって「カスプ磁場への入射実験やプラズマ境界面に関する研究へ将来的に進む」ことを踏まえたプラズマ・ガンによる研究が立案された¹²⁾¹³⁾。新設されるプラズマ研に優先権が与えられたためか、原研は計画の変更を余儀なくされたものと推察される。

ところで、原研の初期研究課題として PIG 放電やプラズマ・ガンが取り上げられた背景には、直近に行われた森茂による米国研究機関への視察経験が影響していたといえる。森によると、非常勤として原研に務めることになった際に、理事長であった菊池正士が働きかけて、事前に欧州の研究所を歴訪していた山本賢三と米国で落ち合う形での出張が実現したという¹¹⁾。森と山本は 1960 年 9 月にボストンで落ち合い、数カ月の期間をかけて米国内の多くの研究機関を見学している。学術誌『核融合研究』に掲載された山本と森の記録¹⁴⁾によると、この時に PIG 放電装置を MIT で、プラズマ・ガンによる実験装置を GA 社やロスアラモス科学研究所(Los Alamos Scientific Laboratory, LASL)でそれぞれ視察しており、MIT では吉川庄一に、GA 社では大河千弘やカースト D.W.Kerst, LASL では同軸型プラズマ・ガン開発で著名なマーシャル J.Marshall らから説明を受けている。特に、当時 LASL や GA 社のプラズマ・ガン研究では、既にプラズマ・ガンとカスプ磁場を組み合わせたプラズマ入射実験が行われており、森は同機関の研究を手本として、原研でのプラズマ・ガンに関するその後の研究展開を策定したと考えられる。

1961(昭和 36)年度に入ると、原研内に核融合直接発電研究準備室が発足した¹⁵⁾。また、実験を開始するために拠点が東京本部から東海研究所に移され、プラズマ・ガンの試作が始まった。研究開始にあたって、核融合グループでは今後の計画を遂行している上での規準として、

- (1) 当時既にすぐれた研究業績をあげている各大学の研究グループの域になるべく早く到達すること、
- (2) 将来に予想されるプロジェクト的核融合研究の段階の準備になること、
- (3) 同時にこの段階になった時に、昭和 36 年度より始める研究が逆に負担とならないこと、

という 3 つの条件が設けられた¹⁶⁾。また、プラズマ・ガンの型式を選定する際に、

- (1) 加速能率が良いことや各種パラメータを変えやすいこと、
- (2) パルス的にガスを導入する装置(パフ)を付けやすいこと、

(3)今後予定している磁場へのプラズマ入射研究へ接続しやすいこと、などが考慮され、マーシャル型の同軸型プラズマ・ガンが採用されている。そして、プラズマ・ガン1号機は研究所内の工作工場で作製され、1961年3月に完成した¹⁷⁾。その際、「プラズマ入射実験に使われる素材としてガンより発射されるプラズマ塊の性質に関する調査」と「プラズマ・ガン自身の物理的研究」が同装置を用いた研究目的として定められた。

1962(昭和37)年度には、上記目的達成のために、早速プラズマ・ガン1号機より発射されるプラズマ塊の質量や速さの測定が行われている。実験では、プラズマ・ガンの出口から約16cm離れた位置にアルミニウム製のディスク状またはカップ状の熱電対(アルメル-クロメル)付きレシーバーを吊り下げ、このレシーバーにプラズマ塊が衝突した際の温度上昇を測ることでプラズマの平均運動エネルギーを、またレシーバーが衝突振り子をなしているとして、揺れの大きさからプラズマの運動量を求めて、これらの測定値からプラズマ塊の質量と速さを導出している¹⁸⁾¹⁹⁾。さらに、速さに関しては光電子増倍管による測定も同時に行われた。ヘリウムプラズマを用いた実験の結果、プラズマ塊の速さは $3 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、質量が $1 \sim 100 \mu\text{g}$ と算出され、「プラズマ塊はこのまま磁場への入射実験に使用可能であるが、銅や炭素といった不純物が多いことが問題点である」と評価された。

一方、同軸型ガンの加速機構や不純物と過渡的ガス分布の関係を追及することを目的として、多くの観測孔を備えたプラズマ・ガン2号機が1963(昭和38)年度に完成し²⁰⁾、プラズマ加速機構の研究やカーセル(Kerr cell)カメラによる瞬間写真撮影、磁気探針によるガン放電電流の測定なども始まった。これに加えて、装置改良の結果、1965年度には高速成分で速さが $(1 \sim 3) \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、密度 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、低速成分で速さが $(2 \sim 4) \times 10^6 \text{ cm/s}$ 、密度 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ というプラズマ塊を得ており、さらに後述する磁場中へのプラズマ入射実験に際して、高温プラズマを得るために、パルスの磁場を加えて低速成分を切断することで、高速成分だけの取り出しにも成功している。

外部磁場へのプラズマ入射実験に関しては、1963～64年度に予備的実験として1000G程度の弱カスプ磁場へのプラズマ塊の入射実験が行われ、捕捉されたプラズマ電子密度の減衰過程に関する計測が行われた²⁰⁾²¹⁾。そして1965(昭和40)年からは、高速成分のプラズマを強カスプ磁場(点カスプで12000G)に入射する実験が開始され、プラズマの磁場への侵入機構の解明とそれに密接に関連するプラズマ流と磁場の相互作用の研究、さらに入射されたプラズマの磁場中への捕捉研究なども実行に移されている²²⁾。なお、カスプ磁場の実験では、主に低ベータプラズマ(カスプ入口で $\beta=0.01$)のカスプ磁場中でのふるまいが調査され、入射されたプラズマは点カスプから急速に(ほぼ通過時間中に)、線カスプからはより緩やかに失われることがダブル・プローブによる計測で確認された。また密度変化を測定した結果、密度は装置の中心に近づくにつれて急速に減少する傾向が見られ、減少する割合は装置の入り口での値と比較して、高速プラズマでは1/2に、低速プラズマでは1/10に減少することが示された。その後、1966(昭和41)年度には双極子磁場へのプラズマ入射実験も行われ、磁気キャビティに侵入するプラズマの経路を実験によって探究することで、プラズマの

侵入経路が磁場零の部分ではなく、赤道面から少しずれた狭い帯状領域からであることが確認された²³⁾²⁴⁾。

なお、プラズマ入射実験では理研・核融合研究室のメンバーが客員研究員として迎えられ、共同研究が行われた。同研究ではマイクロ波干渉計を使用したカスプ磁場中のプラズマ密度の測定を目的として、装置中にあらかじめ閉じ込められているプラズマに対するマイクロ波の相互作用が調査され、プラズマの時間変化に振動が認められている²⁵⁾。また、理研グループの他にも、京都大学ヘリオトロングループとは直線型ヘリオトロン磁場中へのプラズマ入射実験や平均極小磁場中での巨大パルスレーザーによるリチウムプラズマの生成が、東京大学の関口忠グループとは1965年度に巨大パルス・ルビー・レーザー発振装置の製作が共同で行われた²²⁾。

2.2.2 理論研究

前述したように、原研では核融合研究グループが1961年度に正式発足する以前から、笹倉や田中によってプラズマの理論研究が行われていた。1960年の『核融合研究』を見ると、笹倉は日本大学の市川芳彦と共同でプラズマ内の輸送現象に関する理論解析を、田中はプラズマ波の励起についての研究成果を発表している²⁶⁾。1963年度になってプラズマ入射実験が開始されると、理論研究においても、カスプ磁場によるプラズマの保持時間が想定よりも短いことを説明するために、乱流現象によりカスプ磁場とプラズマが混合するモデルをつくり、諸外国の実験結果に対する説明が試みられている²⁰⁾。翌1964年度からは、プラズマ振動の乱れに関する非線型理論や不均一プラズマ振動の理論解析が始まった。後者については、田中が名大プラズマ研に客員研究員として招かれ、プラズマ研のQP装置における実験と関連して、イオン・サイクロトロン加熱の際の振動解析を行い、プラズマ柱の密度分布によるサイクロトロン共鳴のずれ及び幅を定量的に算出している²⁷⁾。この他、1966年度にはお茶の水女子大学理学部の岩田義一を客員研究員として迎えて、一次元電子-プラズマの乱流に関する理論的な総括も行われた²⁸⁾。

2.2.3 その他の研究課題：宇宙空間プラズマ研究

原研の核融合研究グループのメンバーであった河島信樹は、核融合を目指した実験に加えて、宇宙空間プラズマへの興味も持っており、原研のプラズマ・ガンを用いて関連する研究を行っていた。1965年の論文²⁹⁾を見ると、電離層付近のプラズマのイオン温度が未知であることを挙げて、同軸型プラズマ・ガン中の低・中密度プラズマ流をダブル・プローブで測定する実験を行い、電離層プラズマのイオン温度をロケットに搭載した同プローブによって測定する方法を検討している。同稿では、まずプラズマ流が collision-free であるとして、プラズマ流の上流側の電極がイオンを捕集する場合の飽和電流 I_1 と下流側の電極がイオンを捕集する場合の飽和電流 I_2 の比を、プラズマが等方的 Maxwell 分布に従うとすることにより、相補誤差関数 $\text{erfc}(x)$ を用いて

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \operatorname{erfc}\left(\frac{V_0 d}{v_0 2l}\right)}$$

と導出している。ここで、 V_0 はプラズマ流の速度、 d はプローブ電極の直径、 l はプローブ電極間の距離を表しており、上式よりプラズマ流中のイオン熱速度 v_0 を求めることで、イオン温度を算出することができる。そして、プラズマ・ガンによる実験の結果と比較すると、密度 $10^{14}/\text{cm}^3$ 、速度 $4 \times 10^8 \text{cm/s}$ のヘリウムプラズマにおいて、 $I_1/I_2 = 1.4$ であったため、イオン温度は 5eV と算出された。河島はこの結果を分光測定の結果と良く一致し、さらに「電離層中の酸素イオンの温度を 1eV とすると、ロケットの必要な速度は約 5km/s となるので、計測は比較的容易に出来る」と結論を下している。

なお、河島は原研所属中に米国航空宇宙局(NASA)へ留学しており、後述する JFT-1 が完成する直前の 1969(昭和 44)年に東京大学宇宙航空研究所に移籍し、宇宙プラズマの研究に専念することになる³⁰⁾。

2.3 内部導体系装置 JFT-1 による研究

1965 年 9 月に開催された国際原子力機関(IAEA)主催の第 2 回プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議(The Second Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 第 2 回 IAEA 会議)における各国の成果を踏まえて、原研では 1966 年度から次期実験計画の準備作業が始まった。その際、当初はビーム入射方式による核融合研究が検討されていたが、この方式に関する研究の現状では当面は核融合炉との関係が薄いとして、トーラス装置による磁場閉じ込めの検討に切り替えられることとなった³¹⁾³²⁾。

ちょうど時を同じくして、原子力委員会が(第 2 次)核融合専門部会を設立し、原子力特定総合研究として明確な目的を持つ核融合研究開発の具体案を検討しようとしていた。この流れを受けて、原研では所内に核融合研究委員会を設置し、国家的観点からの「大型核融合実験計画の立案」を核融合専門部会に提案することを試みようとした。その後、同委員会は運営の都合上、核融合専門部会の研究小委員会として作業を行うことになり、第 1 段階の研究方針と実験装置の策定がその任務とされた。装置の具体的な検討に加えて、大河千弘や吉川庄一を招聘しての意見聴取等を行った結果、同委員会は第 1 段階の装置として対称性トーラスの予備実験開始を決定し、諸外国でまだ実験が行われていないヘキサポール磁場配位を採用した³³⁾。そして、1968 年 7 月 4 日に原子力委員会は前年度までの議論に基づき「核融合研究開発基本計画」を定め、さらに核融合研究を原子力特定総合研究に指定し、原研はその主計画である「トーラス磁場装置の研究・開発」を行うこととなった³²⁾。これによって、原研内部でも核融合研究は主要な地位を占めるようになり、最終的には予算は 10 倍、人員も 5 倍に増加された³⁴⁾。

原研の核融合グループにおいて、当初より問題とされたのが人員の補強であった。1965 年度に核融合直接発電研究準備室から独立して物理部のなかに核融合研究室が発足したが、

1967年度までに集まった研究室構成員は、森茂、田中正俊、笹倉浩、井上堅司、河島信樹、田村早苗、国枝俊介の7名のみであった。なお、森は雑誌『原研』に掲載された核融合に関する解説の中で、少数精鋭であることを表してか、この研究員7名を「七人の侍」と称している³⁵⁾。この後、松田慎三郎が1968年4月に原研へ赴任し、さらに原子力委員会による上記計画の決定にともなって、急速に人員増強が可能になったという³⁶⁾。

研究面に話を戻すと、原研内においては上述した原子力委員会の決定が出される以前から、既に対称性低ベータ・トーラスに関する予備実験の準備作業が開始されていた。1967年度には、それまでに原研で行ってきたプラズマ入射実験の成果が有効に活用できるとして、低ベータ内部導体系装置に関する磁場計算や各パラメータの比例法則についての検討を行っている²⁴⁾。

新設されることになったこの内部導体系装置は、既存装置の利用を踏まえて、1968年1月に装置の設計作業が始まった³⁷⁾。磁場計算は後に同装置の作業班長を務めた田村早苗と田中が担当し、磁気流体力学(MHD)近似に基づくプラズマ平衡の解析が行われた³⁸⁾。その後、日立製作所に発注が出され、原研-核融合-トーラス第1号機 JFT-1 (JAERI-Fusion-Torus-No.1)と名付けられたヘキサポール型内部導体系トーラス装置は1969年3月に完成した。

他方、JFT-1の予備実験として、既存のプラズマ・ガンをを用いた直線状ヘキサポールおよびクアドルポールへのプラズマ入射の実験も JFT-1 完成までの間に行われた³⁹⁾⁴⁰⁾。実験では、同軸型プラズマ・ガンによって生成されるプラズマを使用して、マルチポール磁場への水素プラズマの入射過程がダブル・プローブや磁気探針によって測定された。直線状ヘキサポール実験でのプラズマパラメータを挙げると、プラズマの速さはガンからマルチポール磁場の入口までが約 $5 \times 10^6 \text{cm/s}$ 、マルチポール磁場中では約 $2.5 \times 10^6 \text{cm/s}$ で、ヘキサポール磁場のセパトリックス ψ_s 上の最小磁場が 500G、入口付近のプラズマ密度が約 3×10^{11} 個/ccであった。また実験の結果として、プラズマを入射する経路上のヘキサポール磁場の強さが 400G を超えると、同磁場中に入射するプラズマは減少することが明らかとなった。そのため、対策としてプラズマ入射時にその部分の磁場を弱くするゲート・コイルが試作され、結果 400G 以上でもゲート・コイルによって入射されるプラズマの量が増加することが認められている。

1969年度に入ると、JFT-1による実験が本格的に開始された⁴¹⁾⁴²⁾。JFT-1の稼働機構について見てみると、同軸型ガンでつくられた水素プラズマ(全粒子数 $\approx 10^{17}$ 、イオンの平均エネルギー $\approx 15\text{eV}$)は、およそ $5 \times 10^8 \text{cm/s}$ の速度で直線型オクトポール磁場に導かれてガイド部を通り、約 2m 離れた JFT-1 の入射口からヘキサポール磁場へ入射される。この時、ガンからプラズマと同時に出てくる中性粒子は、途中 850ℓの容積を持つチャンバー内で拡散させられることになっている。なお、中性粒子数を計算すると、ガン放電後 2.5ms までの時間では $2 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 以下の密度にしか達せず、プラズマの測定には「ガンからの中性粒子は大きな影響を及ぼしていない」と考えられた。

実験において、ラングミュア探針から求めた代表的なプラズマ密度は、 ψ_s 上においてガン

放電後 300 μ s で $5 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ 程度，電子温度が $T_e \approx 2 \sim 4 \text{eV}$ ，シングル・プローブから求めたイオン温度が $T_i \approx 5 \text{eV}$ ，装置のベース真空度は $5 \times 10^{-8} \text{Torr}$ と測定された．また，入射されたプラズマがヘキサポール磁場中を充満する間のプラズマ密度の減衰は大きく，その後のプラズマ密度分布はトロイダル方向に $\pm 20\%$ の範囲で一様になることが確認されている．これに加えて，ヘキサポール中に閉じ込められたプラズマが安定であることは，密度の時間的変動がほとんどないことから判断され，閉じ込め時間はボーム時間の 10 \sim 20 倍と算出された．

一方，理研との共同研究として行われた電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)によるプラズマ生成の場合も，プラズマは安定に閉じ込められたが，密度の半径方向にダブルピークが見出され，これは外側のヘキサポール内部導体へのプラズマ損失が多いことが原因と評価された．翌 1970(昭和 45)年度になると，ECRH 法によるプラズマ粒子損失の詳細な分析のために，ヘキサポール磁場の平均的な強さ

$$\langle B \rangle = \frac{\oint dl}{\oint \frac{dl}{B_{at \psi_c}}} (\psi_c \text{は安定限界磁気面，積分は磁力線に沿って一周する})$$

を変えて実験が行われた⁴³⁾．例えば $\langle B \rangle = 1.4 \text{kG}$ の時，内部導体，支持棒および真空壁での損失はそれぞれ 40%，20%，40% で，この分析から導出した閉じ込め時間 1.2msec は密度減衰から求めた値と良い一致を見た．これに対してプラズマ・ガンによる入射では，同平均磁場 ($\langle B \rangle = 1.4 \text{kG}$) の場合に各損失がそれぞれ 70%，20%，10% の割合になり，磁場が強くなるにつれて支持棒損失が増加し，反対に内部導体損失は減少する結果となった．

この他にも，ヘキサポール磁場にトロイダル磁場を重ね合わせた複合磁場配位での実験が行われ，閉じ込めには大きな変化は見られないが，プラズマ中の密度変動を確認している(1970 年)⁴³⁾．以上の実験結果は，1969 年 9 月にソ連ドブナで開催された第 3 回トーラス閉じ込め国際シンポジウム(The Third International Symposium on Closed Confinement System)⁴⁴⁾ と 1971 年 6 月に米国マディソンで開催された第 4 回 IAEA 会議(The Fourth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research)⁴⁵⁾ で報告された．

2.4 原研の核融合研究に影響を与えた宮本梧楼の「B 計画哲学」

1960 年代の原研における核融合研究には，プラズマ・ガンから内部導体系装置への推移という磁場閉じ込めに関する段階的な研究の展開がうかがえる．このような研究方針に影響を与えたほか，そもそも原研に核融合研究への関心を持ち込み，研究室設立に際して大きな影響を与えたのが，東京大学理学部の宮本梧楼研究室であった．そして，原研における黎明期の核融合研究には，本稿第 2 章で取り上げた宮本が「A-B 計画論争」において主張した B 計画とほぼ同様な哲学が働いていたと判断できる⁴⁶⁾．

宮本研究室に所属していた森は，宮本の B 計画に関する考え方を正確に理解していたものと思われ，山本との米国での研究所視察を参考に，「いずれ展開される B 計画的位置づけの装置での研究，さらには将来的に展開されるであろう大型装置によるプロジェクト研究」

を想定して、1960年よりプラズマ・ガンの研究を開始したと推察される。また、原子力委員会による「核融合研究開発基本計画」の決定以前から、低ベータ軸対称性トーラス磁場を使ったトーラスの予備実験を行うことが原研内部の検討を経て既に決定していた点も、将来の研究展開を踏まえてのものといえる。現に、結果として上記「基本計画」においても、JFT-1は中間ベータ値トーラス磁場試験装置 JFT-2の予備実験として位置づけられている。時代背景を考慮すると、1959年と1966年の判断を単純に比較することは出来ないが、両議論の展開を見ると首尾一貫して「宮本哲学」が働いていたことは明らかである。このように、1960年代の原研における核融合研究では実験装置を建設するに際して「宮本哲学」の影響を少なからず受けていたと考えられ、特にJFT-1は「B計画的位置づけの装置」として、JFT-2からJT-60へと続く原研の大型装置によるプロジェクト研究の基盤構築の役割を果たすと捉えられるだろう。

JFT-1の実験は当初2か年計画であったが、結局は1972(昭和47)年度まで実験が行われ、核融合研究開発基本計画が定めた「トーラス装置に習熟し、第1段階の主装置の設計、製作及びこれによる研究に備える」という目的を達成し、1973(昭和48)年6月に実験を終了した。一方、1969年度より中間ベータ値トーラスに関する設計作業が始まり、1972年3月末にはトカマク型装置 JFT-2が完成する。据付け完了後、JFT-2は同年4月上旬に2日間にわたってプラズマ発生試験を開始し、60kAのプラズマ電流を検知した⁴⁷⁾。その後、本格的に実験が行われ、1972年12月には電子温度300万度を記録し、さらに1975(昭和50)年2月には電子温度1000万度、イオン温度400万度を記録した。この後、1974(昭和49)年8月には涙滴型プラズマ断面を持つ改良型トカマク装置である JFT-2aにより、ダイバータによる不純物低減を研究する世界初の実験が行われ、加えて1975年7月に原子力委員会が定めた「第2段階核融合研究開発基本計画」に基づき、1985(昭和60)年4月にはトカマク装置 JT-60が運転を開始する。同装置は核融合積や高周波による電流駆動値などの性能面で、従来の結果を大幅に上回る世界最高記録を記録し、JET(EU)やTFTR(米国)とともに「3大トカマク」と称されるようになった⁴⁸⁾⁴⁹⁾。

3. 電気試験所における核融合研究黎明期の歴史

3.1 電試における核融合研究の開始と“研究項目”としての確立

電試⁵⁰⁾における核融合研究は1957(昭和32)年度から始まったが、その前年である1956年には既に基礎実験の準備が開始されていた。1956(昭和31)年12月の『電試ニュース』83号⁵¹⁾には、電力部・第2電力課の放電研究室・避雷器研究室の報告として、準備体制が次のように記されている；

これまで、主として原子力の平和利用法として、核分裂反応の研究が行われていたが、さいきんこの反応と異なった反応、すなわち、熱原子核反応(融合反応)に関する研究が各国で真剣に考えられるようになって来、すでにソビエットにおいては、放電を用いて融合反応を起すことができたという論文が、発表されている。・・・(中略)・・・

なお、現在のところ、この超高温の発生的手段として、放電を用いて行う方法が有力な手段と考えられているので、こんど、当所電力部放電・避雷器研究室等が協同して、当初既設の衝撃電流発生装置(静電容量=2×16μF, 充電電圧=85kV, 最大放電電流値=20kA)を下記の要領で改良し、第1次計画として、藤倉電線 K.K.と協同のもとに、当初の衝撃電流発生器の改造案を作成し、この基礎研究の準備を開始した・・・

上記の衝撃電流発生装置は同型のものでは当時日本最大規模の装置で、1942(昭和 17)年頃から法貴四郎らによって開始されていた避雷針や放電の研究にその背景があるといえる。なお、同装置は 1957(昭和 32)年度の所内研究費(100 万円)を投じて改造が行われ、回路のインダクタンスを減らすことによって最大 600kA の電流を得ることが可能となった⁵²⁾。

その後、電試では 1957 年から直線状放電管による超高温プラズマの実験およびプラズマ診断の研究が開始された。直線状放電管による核融合反応の研究では、重水素・アルゴン・空気等を用いて実験が行われ、初期段階において早々に中性子の存在を確認している⁵³⁾。この実験を行った時点では中性子の発生機構は断定されていないが、1963 年に刊行された『電気試験所記念論文集(七十周年記念)』⁵⁴⁾の川俣修一郎の報告には、この時に発生した中性子は「プラズマの不安定現象によるものであることが後に判明した」と記されており、結果として熱核融合反応による中性子の生成は出来ていなかったようである。

また 1958(昭和 33)年からは、トロイダル放電装置による実験も始まった。同装置は、放電電流の正確な測定法および各種ガスを用いた時のプラズマの物理的諸特性を解明することを目的として設計され⁵⁵⁾、1959(昭和 34)年には同装置を用いた 1 ターンコイル法やロゴスキーコイル、磁気探針による計測実験が行われた⁵⁶⁾。この他にも、英国 ZETA の 1/3 程度のトーラス装置が建設され、さらに小型の角型鉄心トーラスやガラス製トーラスの製作、関連技術として高速度流しカメラや高温プラズマ温度測定用分光器の開発等が行われ、電試における核融合研究は華々しさを増したことがうかがえる。

このように多くの新装置が製作された背景には、電試として核融合研究の推進が決定したことが影響していたと考えられる。現に、1958 年度から業務計画の中に研究項目として「核融合反応に関する研究」が以下のように加えられている⁵⁷⁾；

IX 核融合反応に関する研究

(1)超高温プラズマと核融合に関する研究

新しく採り上げた研究項目で、すでに 60 万 A の衝撃電流によるプラズマの研究は成果を上げており、それらの設備の拡充を行うとともに、超高速撮影装置その他の測定の研究を行う。

研究費は、昭和 33 年度に「プラズマ診断の研究」として 2,000 万円、34 年度に「トロイダル放電の研究」と「プラズマ診断の研究」に 5,224 万円が組まれた。さらに、研究成果は所内の電試各部課研究討論会⁵⁸⁾にて、重水素中の衝撃大電流放電(報告：川俣)や Toroidal 放電プラズマに関する実験(報告：山田太三郎ら)が発表されている。この他、機器部溶接機器研究室主任技官の小沢正義が、1959 年 9 月よりミシガン大学にて大電流プラズマジェットの

実験に参加するなどして、海外の研究機関での核融合研究の実情についての把握も計られた⁵⁹⁾。

3.2 テータピンチの研究開始と山田太三郎の IAEA 会議欠席

1958(昭和 33)年 5 月にはテータピンチに関する研究が開始され、1959(昭和 34)年から同装置を用いたプラズマのふるまいについての研究が始まった⁶⁰⁾。テータピンチ装置は所内で行った実験(アルミ電極+硬質モリブデンガラス製と銅電極+テレックス製ガラス製の各放電管の電圧・電流特性の実験)から、放電管には硬質モリブデンガラス製放電管が、具体的な装置の型には LASL の装置シラ(Scylla)と同じ型式の放電装置が採用された。

シラ型放電管装置による研究は、プラズマ保持の調査を目的として実験が行われ、1960 年までに次の成果を得た：(1)プラズマの半径方向および管軸方向の動きを同時に「流しカメラ」により観測し、プラズマ体積の時間変化を調べた。(2)ロゴスキーコイルおよび磁気探針を挿入した放電管によって、テータピンチ装置におけるプラズマ電流を測定した。その結果、電流は $t^{5/2}$ に比例して立ち上がること等が判明した。(3)8mm マイクロ波を用いて電子密度を測定したところ、 $10^{14}/\text{cm}^3$ を越え、コイル電流が零になった後も尚 10 μsec 程度の間、電子密度が遮断密度以上であることを認めた。(4)さらに重水素ガスを充填した実験では、コイルに蓄電器放電電流を流す毎に 10^4 個程度の中性子を観測した⁶¹⁾。

以上の成果は、1961 年 9 月開催の第 1 回 IAEA 会議(The First International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research)⁶²⁾に提出され、さらに IAEA での発表論文選考の結果、日本から提出された 7 件の論文で唯一の口頭発表に選出される運びとなった⁶⁴⁾。日本からの発表で電試の発表が採択された理由としては、当時世界のテータピンチ研究が「同型の装置での核融合反応による中性子の生成が可能か」ということに関心があったため、「テータピンチ装置の実験で中性子を観測した電試の発表論文が注目を浴びた」ということが考えられる。ところが、講演者であった山田が会議に欠席したため、口頭発表は会議直前で取り消しとなってしまう⁶³⁾。同会議に出席していた木原太郎(東大理)は、山田の欠席に関して会議報告の中で次のように言及しており、核融合懇談会を中心とした核融合研究者のコミュニティ内で、少なからず山田の欠席に対する批判があったことがうかがえる⁶⁴⁾；

・・・3 年後の次回の会議に大きく貢献するために、1 年程前より総合的対策を立てる必要があろう。特にプログラムに組まれた講演を取り消すことのないように、参加者の決定を早い時期にしなければならない。

3.3 逆転安定磁場トーラスと宇宙開発関連技術研究の開始

一方、電試内では 1961(昭和 36)年 8 月から逆転安定磁場トーラス装置の据付けが始まった。同装置はスーダム B.R.Suydam が 1958 年 9 月の第 2 回ジュネーブ会議で発表した円筒プラズマの安定条件

$$\frac{r}{4} \left(\frac{\mu'}{\mu} \right)^2 + \frac{8\pi p'}{B_z^2} > 0$$

$$\mu = B_\theta / r B_z,$$

p : プラズマ圧力,

r : プラズマ中心からの距離,

“'” : r に関する微分,

B_θ, B_z : 円筒座標系における磁束密度 B の θ, z 成分

の第 1 項に当たる磁気シアを大きくした装置として計画され、1963(昭和 38)年頃にはプラズマ閉じ込めの研究が開始された。放電管は直径 120cm, 切口直径 21cm の磁器製トーラスで、環状電流を流すために一次コイルと安定化磁場発生用コイルが巻かれている。同装置を用いた実験としては、例えばプラズマがない場合の安定化磁場および逆転磁場の性質に関する調査がなされたり⁶⁵⁾、逆転安定磁場を使ったプラズマ閉じ込め装置の一次導体電流により生ずる磁場の測定結果およびその補正に関する研究が行われたりした⁶⁶⁾。

なお、電試では 1962(昭和 37)年度より部課制を廃止して、部研究室制を敷くとともに、組織が大幅に改正された⁶⁷⁾。その結果、それまで電力部で行われていた核融合研究は機器部のプラズマ研究室(室長 森英夫)で遂行されることになった。これは、エネルギー分野で、かつプラズマに関するものを機器部プラズマ研究室にまとめるという方針が取られた結果で、同時に研究者も他部との交換が行われている⁶⁸⁾。

上述したように、さまざまな実験が行われた逆転安定磁場トーラス装置ではあるが、1964(昭和 39)年度に行ったロゴスキーコイルによるプラズマ電流や磁気探針によるプラズマ中の磁束密度分布の測定、さらに高速流しカメラによる観測などの結果、不整磁場の影響によって発生したプラズマは不安定であると判断され、また高エネルギー電源である 240kJ コンデンサー・バンクの制御が困難であったとの認識から、同装置の再設計および計画自体の見直しが決まる⁶⁹⁾。

この後、電試の核融合研究は逆転安定磁場トーラス計画の見直しを踏まえて、プラズマの基礎的研究と関連技術の向上を主目的とするようになった。同時期に、学術誌に投稿された電試の核融合関係の論文は、既存装置を用いたプラズマ診断に関する研究、主としてマイクロ波および分光による診断の研究やテータピンチ建造のための技術開発が中心となっている。プラズマ診断に関する研究自体は電試でも矢作栄一や山下栄吉らが 1960 年頃から研究を行っていたが⁷⁰⁾、『工業技術院年報』によると、1965(昭和 40)年度の電試における核融合研究は「光学的測定やマイクロ波診断に関する研究」、「超高温プラズマの巨視的ふるまいの高速流しカメラでの観測」などが中心課題とされており、この段階で完全に核融合反応を直接狙った研究からプラズマを観測する方法の研究への方針転換がうかがえる⁷¹⁾。また 1968(昭和 43)年 6 月に科技厅外国人招聘制度を利用して、プラズマ診断技術の研究者であるアメリカ国立標準局(NBS)電波物理部のモスバーグ E.R.Mosburg を招聘したことからも、計測技術開発が中心課題になったと判断できる⁷²⁾。この時期に行われた計測の研究として

は、弘田公らによる既存の逆転安定磁界トーラス装置を用いた高温プラズマの分光測定⁷³⁾や矢作らによるマイクロ波プラズマ診断装置による移相量の測定が挙げられる⁷⁴⁾。

ところで、電試においてもプラズマ研究室の発足後、宇宙空間プラズマに関する研究が原研とほぼ同時期から開始され、電試内で行われていた宇宙開発関連技術開発における「宇宙環境における物性研究」に関与することとなった。1966(昭和41)年にはイオンシースによる影響を受けないイオン共鳴探針を開発していて、同探針は「プラズマ密度が既知であれば、磁場等を使わずにイオンの種類を知ることができる」として、論文内では「電離層プラズマの諸量測定に適している」との結論が下されている⁷⁵⁾。また、1968年には宇宙プラズマ診断用ファブリペロー共振器の開発⁷⁶⁾が、1969(昭和44)年には電離層および磁気圏のプラズマを電離層シミュレーターによって再現する実験⁷⁷⁾が行われた。

3.4 100kJ テータピンチ装置完成と「核融合研究開発基本計画」への参画

他方、1966年以降にはプラズマの診断技術向上と並行して、高エネルギーコンデンサー・バンク放電によって生ずる過渡プラズマ制御技術の開発が重点研究に置かれた。これに関連して、1967年には2.2 μ Fのコンデンサー200個からなるコンデンサー・バンク(コンデンサー全容量440 μ F, 最高充電エネルギー200kJ)を有するテータピンチプラズマ発生装置が作製され、流しカメラやレーザー干渉計による診断が行われている⁷⁸⁾。同実験はテータピンチ放電管中にプラズマを生成し、ルビーレーザー光を光源とするマッハツェンダー干渉計を用いて各種パラメータを測定するというもので、1968年3月の『電気試験所彙報』に掲載された与世里盛宏らの論文⁷⁹⁾によると、プラズマ密度に関する空間分布の干渉縞から、プラズマが30cmのコイル長にわたって一様であると仮定すると、等密度線の間で密度は $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ だけ変化していることになり、中心付近での平均電子密度は $4 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以上 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下であると推定された。さらに、観測されたプラズマには干渉縞から第2半波で交換型不安定性が認められ、「第2半波より第3半波の方が、密度が高い」という測定結果を併せて考えると、第2半波は「第3半波で出来るプラズマの予備加熱の働き」をしていて、これによって密度が上がる一方、イオン温度も上昇し、第3半波で不安定性が減少するものと推定され、同稿では「予備加熱が安定なプラズマを発生する上に重要なことを示している」と結論されている。

1968年7月になると、原研と同様に原子力委員会の「核融合研究開発基本計画」に基づき、新装置による研究が行われることになった。その中でも電試は、「将来(第二段階以降)における高ベータ・トーラス磁場装置の研究開発に備えるため、テータピンチ装置による研究開発を、主として高ベータ・プラズマの挙動を解明すること」⁸⁰⁾となり、これまでの技術研究の成果を踏まえた100kJの直線テータピンチ装置の設計・建設が始まった。1969年6月に完成した同装置はバイアス磁場発生用バンク(5kV, 33kJ), 予備電離バンク(40kV, 1.2kJ), 主圧縮用バンク(30kV, 100kJ)という3つのコンデンサー・バンクを備えており、予備加熱およびバイアス磁場印加回路を持つ100kJ級の同型装置としては当時日本初の装置であっ

た⁸¹⁾。装置完成直後に行われた主圧縮用バンクのみを用いた実験では、直径 5cm の放電管をコイルに挿入した時に発生したプラズマの電子密度分布を先の実験でも使用されたマツヘンダー干渉計を用いて観測した結果、予備電離を行っていないために、第 1 半波ではプラズマは干渉計で検知できる密度に達せず、また第 2 半波では圧縮初期に激しい交換型不安定性が発生していることが確認された。その後、プラズマは第 3 半波で始めて正常に圧縮されているが、圧縮磁場が最大となる時刻付近からモード $m=2$ の交換型不安定性が生じ、これ以降密度は急激に減少した。これは圧縮磁場の不均一性によるものと推定され、またプラズマがコイルの電流供給部および架台方向に約 4mm 偏位している点については、圧縮磁場の対称性の悪さに起因するものと考えられた。他方、予備電離プラズマの密度については、He-Ne レーザー干渉計で管軸上の時間変化および管径方向の空間分布が測定された。その結果、アフタグローでも、50mTorr 以下で約 90% の電離度があり、時定数(密度が最大値の $1/e$ に落ちる時間)は約 50 μ sec であることや、予備電離バンク投入から約 40 μ sec で、直径 10cm の放電管全体にほぼ一様な $10^{15}/\text{cm}^3$ 程度のプラズマが出来ていることが観測された。なお、予備電離プラズマを主磁場で圧縮した時の電子密度は、第 1 半波で最大となることが He-Ne レーザー干渉計の時間応答から、また分光測定により電子温度は約 7eV であることが確かめられている⁸¹⁾。

その後、1970(昭和 45)年度にはイメージコンバーターカメラや反磁性ループを使用して、プラズマのピンチ時間や半径方向の振動、閉じ込め時間などが再度精密に測定され、レーザーや分光の診断から得られたプラズマパラメータおよび計算機シミュレーションの結果と比較・検討が行われた。その結果、実験で得られたパラメータは計算機での結果とほぼ一致し、MHD 的近似可能な 30mTorr から 200mTorr でのテータピンチプラズマの性質が明らかになった。例えば、イオン温度は紫外領域における不純物線のドップラー広がりから最高 280 万度、密度はマツヘンダー干渉写真から最大 $1.1 \times 10^{17}/\text{cc}$ であることが判明している。なお、磁気ミラーを装置に附加していないため、プラズマはコイル端部での損失によってコイル中央部では 2~3 μ s しか保持できていない⁸²⁾。以上のような同装置による研究成果は、1971 年 6 月の第 4 回 IAEA 会議で発表された⁸³⁾。

この他、1967(昭和 42)年度からは超高温プラズマの発生に関して、高エネルギーコンデンサーバンクの制御技術の一つであるクローバー・スイッチ技術の開発が始まった⁸⁴⁾。当初は真空ギャップスイッチを検討することを予定していたが、インダクタンスが大きく保守にも難点があるため、当時としては新しい技術であった誘電体スイッチが取り上げられ、200kJ のギャップの並列運転実験装置に適用して電流容量の限界等の検討や特性が確認された。しかし、同型のスイッチも操作の複雑さがあつたためにクローバー・スイッチには使用されず、最終的には 1969 年度に試作されたマルチアーク式のものが 100kJ テータピンチ装置に取り付けられ、同方式が有望であることが確かめられた⁸⁵⁾。また、1969 年度には 8kJ の小型直線テータピンチ装置の建設も始まった。同装置は、主として技術的問題の解決を目的とした 100kJ テータピンチ装置とは異なり、高ベータプラズマの生成と加熱機構の解明と

いう目的を達成するのに適した装置を造るという趣旨で設計され、磁場の立ち上がり速度を最高 $5 \times 10^{10} \text{G/s}$ から $2.5 \times 10^9 \text{G/s}$ までの範囲で、磁場の最大値をほぼ一定に保ちつつ変化できるという特徴を持っていた。1970 年度には同装置が完成し、プラズマへのエネルギー注入効率に対する磁場の依存性や磁場の異常に早いプラズマへの浸透などの新しい現象が観測された⁸⁶⁾。

1970 年 7 月 1 日、電試は名称を電子技術総合研究所(電総研)へと変更した⁸⁷⁾。この変更は、1963 年に電気用品試験関係を、1965 年に検定部門を分離したことによる研究部門の拡張および電子技術研究への重点の移行が大きな理由であった⁸⁸⁾。所名変更後、電総研では上述した 100kJ テータピンチ装置に加えて、トロイダルスクリュウピンチの研究が本格的に開始された。トロイダルスクリュウピンチは、「高ベータプラズマの閉じ込め研究に際して端損失がないトラス装置が好ましく、さらに平衡の存在が確実である配位である」ことを理由に、1969 年度から研究が始まった。同装置は、金属殻で覆われたトロイダル状ガラス放電管の外側に巻かれた 2 種類の互いに直交する一次コイル(トロイダル方向 Z とポロイダル方向 θ) に、立ち上がりの非常に速い電流を流し、その誘導によって放電管の内部に高温の放電プラズマを作り、らせん状磁場(トロイダルスクリュウピンチ磁場)によってプラズマを閉じ込めるというもので、電試における試作装置は 1970 年 6 月に完成した。トロイダルスクリュウピンチはその後に閉じ込めの改良を重ねて、1971(昭和 46)年にはイオン温度約 20 万度、密度 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ のもとでクローバー回路を附加して約 $25 \mu\text{s}$ の保持時間を得ている⁸⁹⁾。

3.5 山田太三郎の講演からうかがう 1960 年代における電試の核融合研究

このように、1957 年から始まった電試の核融合研究は、国内での核融合研究の流れ(A-B 計画論争やプラズマ研の設立等)に大きな影響を受けず、独自の方針に基づいて着実に研究が行われていたように見受けられる。

1960 年代の電試での核融合研究において、最も不明な点は山田の第 1 回 IAEA 会議欠席である。彼の欠席理由を明確に記した史料は発見できていない。以下では、山田の講演での発言から、電試における核融合研究の変遷について再考したい。

山田は 1936 年 3 月に東京帝国大学工学部電気工学科を卒業後、同年 4 月に電試へ入所した。入所後、山田は直流送電や超高压送電、高压直流送電技術、原子力発電に関する研究開発に従事し、1952 年には電試電力部長に就任する。後年、核融合を含む原子力発電に関心を持った経緯について、1995 年に出版された『先輩から後輩へ エネルギー研究者へのメッセージ』の中で山田は次のように記している⁹⁰⁾；

・・・終戦後間もない昭和 20 年 10 月の或日、私は田無分室の自分の部屋から漠然と外の畑を眺めていた。私は入所後ずっと送電技術の問題を追い続けていたが、電気事業としては送電線だけあっても発電部門の力が弱くては何もならないので、発電についての研究をする必要があるのではないかと考えた。しかし、通常の水力発電や火力発電の分野に入り込んでも大して新しい問題はないだろうし、いわゆる“Exotic Energy Source”

による発電を検討したらどうかという事を考えた。そして頭に浮かんだのは、風力発電、地熱発電、潮力発電や原子力発電等であった。・・・

つまり、山田は電試入所当初から電力開発にも関心を持っており、原子力(核分裂炉)に関しては1947年頃から既に調査を始めていたという。

その後、1956年に電試で核融合研究が始まると、山田は核融合研究班の代表を務めることになった。研究が開始された際に、彼が川俣らとともに研究に直接かかわっていたことは文献史料からうかがえる。例えば、1957年10月の第2回核融合懇談会⁹¹⁾には当時所長の後藤以紀とともに山田、川俣が出席し、1958年2月の核融合懇談会の研究報告では、改造を行った衝撃大電流放電装置による実験成果を山田が発表している⁹²⁾。また、山田は1958年9月に開催された第2回ジュネーブ会議に日本代表団顧問として出席しているが、その際にも同会議への出席目的の一つに世界の核融合研究調査が含まれていたという⁹³⁾。

山田は1957年に行った電試秋季公開講演会⁹⁴⁾の中で、原子力平和利用研究について講演を行っている。彼の講演は先ず、電試における核融合研究開始の背景には、(1)当時核融合反応を起こすための最良の手段とされていた大電流放電の技術を日本で古くから研究していたこと、(2)核融合反応の平和利用という関心が世界的に高まってきたことの2点があったと述べている。さらに、核融合反応の利点として、資源の偏在がないことや生成物に放射性物質の問題がないこと、熱サイクルを経由せずに直接発電を効果的に行える可能性があることなどを挙げている。そして以上を踏まえて、講演の数年前に開始した衝撃電流発生装置の成果や今後の計画についても触れている。さらに、核融合反応時に発生する中性子は原子炉の中性子源にも利用できるとして、「核融合-核分裂ハイブリッド炉」の可能性についても言及している。この時の講演では、核融合炉実現への期待は大きく、ハイブリッド炉の考え方を出した点や山田自身の経歴から考えると、山田の中では「核融合炉の開発」＝「原子炉の開発の一環」として捉えていたと判断できる。

ところが、1966年に山田が電試の第12代所長に就任した後⁹⁵⁾、同年11月16日に行われた「工業技術院電気試験所創設75周年記念講演会」(於電気工業会館)の中で、核融合反応の実用化に関して、彼は次のように述べている⁹⁶⁾；

・・・遠い将来の夢として核融合の問題があります。...(中略)...問題は核融合反応炉が具体化する時機です。1955年にインドのBhaba博士は20年後に具体化すると予言したのですが、それから十年余を経過した今日でも依然として“20年後”は変わりません。強気、弱気の観測がありますが、どうも今世紀の技術ではなさそうに思われます。しかし、成功すればその効果が極めて大きいので各国とも力を入れて研究を進めております。・・・(中略)・・・具体化の遠い事象は“バラ色”に見えるものです。核融合反応も具体化の時期が近づくと“バラ色”の夢通りになるとは限りません。・・・(中略)・・・要するにだんだん実際に近付いて来ないと正確な評価は出来ない訳ですが、現在のところ原子炉の発達とはかけ離れた遅い速度で研究が進んでいる訳で具体化する姿は現在研究されている実験装置に類似したものであるかどうかとも判りません。しかし、近年プラ

ズマ物理に関する研究も次第に進んできたので、1億度というような超高温を比較的長く(1秒位)保持するということが、目的の核融合反応炉の設計(?)も可能に近い状態にあるとも言えますので、未来を開く最も大きな窓である核融合反応の研究には力を入れて行く必要があります・・・

この講演で注目すべきことは1957年の講演と異なり、核融合炉はあくまで「将来の夢」として考えて、極端に期待をかけるということは無くなった点である。また電試における核融合研究の現状に全く触れていない点も、先の講演との違いである。これには核融合研究の継続は必要ではあるが早期の実現が難しいという点に加えて、核融合と同じエネルギー分野の研究課題であるMHD(電磁流体式)発電に関する研究が電試の大型工業技術研究開発(大型プロジェクト)になったことも影響したものと推察される。

電試内では1961年からMHD発電の研究が本格的に始まった。当時、既に米国アブコ(AVCO)研究所などでMHD発電に関する研究が進められており、直接発電の方式として注目が集まっていたこともあって、電試でも山田や森英夫らを中心に同研究が開始されたという。同時期の『電試ニュース』に掲載された記事を見ると、山田らがMHD発電方式に対して大きな期待を持っていたことがうかがえる⁹⁷⁾；

・・・MHD発電機は研究開始後日も浅く、実験用発電機も完全なものでないという前に前章で述べた種々の研究課題が残されている。そのほか気体の導体では、銅のような固体導体とは同一に扱えないところがある。内部の導電現象、電極界面の導電現象にも特異な問題が認められており、解決を要する事項は少なくない。しかし原理的には優れた方法であり、最近の各方面の科学技術の急速な進歩を考えると、その具体化の比較的早いことも予想され、将来の大型発電所の発電方式として望みを託するに足りるものといえよう。

その後、MHD発電は業務計画の中で「エネルギー対策技術」として位置付けられ、機器部プラズマ研究室の森英夫、伏見光造らによって強力に推し進められた⁹⁸⁾。また、前述したように、1966年度からはMHD発電の研究が通産省の長期大型プロジェクト開発研究計画⁹⁹⁾に組み込まれ、電試内でも大型プロジェクトに位置づけられることとなった。実験装置に関しても同66年には予想電気出力1000kWの実験用MHD発電機¹⁰⁰⁾が完成したほか、超電導マグネットなどの関連技術開発も日本大学の安河内昂らを電試流動研究員として招くなどの対応が取られた¹⁰¹⁾。電試におけるMHD発電への注目の度合は、『電気試験所彙報』の中で1960年代にMHD発電の特集が3回組まれていることから判断できる。これに対して、MHD発電の研究が電試機器部における主テーマに確立したことによって、1961年以後、『電気試験所彙報』や『電試ニュース』の中で核融合研究に関する大きな特集が組まれることは無かった。

山田の発言や当時の状況も包含して考えると、1950年代半ば、電試でも他の研究機関と同様に核融合炉の早期実現に期待を持ち、加えて避雷針などの研究というバックグラウンドも踏まえて、核融合研究が華々しく始まった。ところが、逆転安定磁場トーラス研究での

失敗に加えて、同じプラズマ研究でも MHD 発電に関する研究を大型プロジェクト研究の一環として推進したことも影響してか、1960 年代中頃には一時、プラズマ診断や関連技術開発等の基礎的研究中心という直接的な核融合研究から遠ざかった停滞期に入ってしまう。しかし、1968 年の「核融合研究開発基本計画」への参画の頃、停滞期に蓄えられた知識と技術を踏まえて 100kJ テータピンチ装置の実験が開始され、結果として電試は国内における高ベータ・プラズマ研究の中心組織としての地位を確立することになった。

1971(昭和 46)年以降、電総研ではトロイダルスクリーパーピンチ TPE-1 や TPE-2 などの装置が建設され、さらに 1974(昭和 49)年には小川潔の先導下で TPE-1 の電源部分を改造し、マイクロ秒オーダーの高速磁場制御による逆磁場ピンチによる実験が始まった。これは、この後に続く TPE-1RM から TPE-RX までの電総研およびその後身機関である産総研における逆磁場ピンチプラズマ研究の礎となる¹⁰²⁾。なお、産総研における核融合研究は 2007 年 3 月に終了し、電試から続く核融合研究はほぼ半世紀を経てその幕を下ろすこととなった。

4. 理研における核融合研究黎明期の歴史¹⁰³⁾

4.1 理研核融合研究室の設立と起源

『理化学研究所ニュース』第 22 号(1970 年 7 月)に掲載された岡本耕輔の記事¹⁰⁴⁾には、理研に核融合研究室が創設されたのは 1958(昭和 33)年と記載されている。また、『理研 50 年』(1967 年)¹⁰⁵⁾に掲載された研究室系統図を見ても、核融合研究室は仁科芳雄研究室(研究室存続期間 1931 年～1951 年)から分家した杉本朝雄研究室(研究室存続期間 1952 年～1957 年)を起源として、1958 年に設立されたことが分かる。これまでの調査で、1958 年に刊行された文献史料の中に研究室設立を示す直接的な記述は発見できていないが、1959(昭和 34)年に行われた第 55 回理化学研究所学術講演会において「低電圧大容量コンデンサバンクによる放電プラズマの性質について」や「陰極輝線より放出するプラズマの電荷量」といった核融合研究に関連する内容の発表が行われ始めていることなども考慮すると、理研に核融合研究室が創設されたのは 1958 年と断定できる¹⁰⁶⁾。

研究室設立当時の主任研究員は、他の研究室と兼任で宮田聰が務めていたが、「核融合」が電気工学・電子工学・原子物理・原子核・真空工学など多くの研究分野と関連しているため、宮田の他に篠原健一、山崎文男、新聞啓三、千谷利三の 4 名が主任研究員として研究室に加わり、理研内でもあまり採用されていない「集団指導体制」が取られた。研究室創設の経緯に関する説明は、1960(昭和 35)年の『理化学研究所報告』¹⁰⁷⁾にある宮田の記述に見受けられる；

・・・理化学研究所は日本の原子力研究の発祥の地であり、また理化学の諸分野にわたって広く総合研究ができる^{原文ママ}特点もあるので、次の時代の新エネルギー源の基礎となる核融合の研究を取り上げることはもっとも時宜に適したことである。こんなわけで本研究室はまだ創設されて日も浅いが、できるだけ所内の関連ある方々の力を結集して、これから発展してゆく重要な研究の一端を担って国内的に協力してゆこうというので

ある。

宮田はさらに続けて、日本は核融合研究において後進国であるため、「いたずらに模倣追随するのでは将来にわたって真実の模倣を培うことにはならない」として、理研では腰を据えて基本現象の探求から始めるとしている¹⁰⁸⁾。

なお、宮田の記述を見ると、理研の核融合研究も電試の場合と同様、既存の先行研究をもとにして始まったことが分かる。そのため、核融合研究室に所属した研究者は自身の分野と兼任の形で核融合研究も担当することになり、初期メンバーとそれぞれの担当分野は以下のように振り分けられた。

電気測定：円城寺博，大塚郁夫，古市昭夫，御所康七，

マイクロ波温度測定：坂本雄一，三好昭一，

スペクトログラフによる温度測定：森一夫¹⁰⁹⁾，

瞬間撮影技術：難波進，

真空技術：石部幸雄，岡本耕輔，

これに加えて、東京大学の本多侃士(元理研主任研究員)が研究室発足を支援し、また東大本多研の助手であった玉河元、藤田順治が研究所に出入りして研究室の本格的始動に寄与している。

4.2 初期の核融合研究装置：高エネルギーアーク装置の建設と理論研究の開始

研究室発足時の理研における核融合研究用実験装置は、「高温プラズマ現象の測定を行い、プラズマに関する各種の基礎的資料を得た上で、長時間のプラズマ閉じ込めを狙った装置を建設する」という目的のもとで「準備段階的な装置」として位置づけられ、直線状放電プラズマ発生装置が採用された。1959(昭和34)年に名古屋大学で行われた「超高温プラズマ発生装置研究会」での理研の報告を見ると、装置に関する放電電源の構造・特性や迅速充電装置、点弧装置、測定装置についての説明がなされている¹¹⁰⁾。同報告によると、装置は内径104mm、厚さ3mm、長さ160mmのパイレックスガラス(耐熱ガラス器)製で、理研の電気工学研究室によって開発された500Vの電解コンデンサーが電源として使用された。計測に関しては、マイクロ波によるプラズマ診断が重点に置かれ、さらにこれと並行して探針測定、スペクトル分析、プラズマ状態の時間的推移の観測も計画された。

そして、1960(昭和35)年度になると、研究室では上記装置を用いた以下の9つの研究テーマが設けられた¹¹¹⁾：(1)直線状放電プラズマ発生装置の放電管および真空排気系統の改善と真空度試験、(2)直線状放電プラズマ発生装置の強磁界発生装置の設計・建設、(3)磁界サーチコイル、磁気探針、コマ撮りカメラによるプラズマのふるまいの観測、(4)スペクトル分析によるプラズマの不純物検出と電子温度の測定、(5)マイクロ波(波長3cm, 8mm)によるプラズマの電子温度、電子密度分布の測定ならびに測定法の研究、(6)高周波磁界による予備加熱の研究、(7)探針によるプラズマの電子密度および電子温度の測定、(8)コイル内磁場分布の計算、(9)軸対称波状磁場によるプラズマの不安定性の理論的研究。

その後、1961(昭和36)年3月に宮田が定年退官すると、代わって篠原健一が主任研究員となった¹¹²⁾。また、1961年度より原子力平和利用研究の一環として科技庁より分担された「原子力平和利用委託研究費」¹¹³⁾を用いて、オークリッジ国立研究所(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)と同型の高エネルギーアーク発生装置の建設が決定する。この装置は放電管直径20cm、アーク長50cmで、磁界の強さは最大4500G、排気系は12inchと6inch拡散ポンプを備えることが予定され、1962(昭和37)年6月頃の運転開始を目標として設計・発注が行われた¹¹⁴⁾¹¹⁵⁾。なお、高エネルギーアーク発生装置建設の背景には直線状放電プラズマ発生装置において、電極からの不純物の混入を避けられず、プラズマが不安定であることが大きな理由の一つであった¹¹¹⁾。

他方、同時期には核融合研究室の松田享子が東京大学の木原太郎と共同で、プラズマの安定化に関する理論研究を行っている¹¹⁶⁾。松田らは、1960年にローゼンブルース M.N.Rosenbluth とロングマイヤー C.L.Longmire が発表した磁気流体力学に基づく磁場によって閉じ込められたプラズマの安定性¹¹⁷⁾、つまり、最小磁場配位 $\delta \int dl/B < 0$ による交換型不安定性の安定化理論に基づき、

$$B = B^* \{1 + 2\alpha(1 - \cos kz)\}, k = 2\pi/L$$

という緩やかな正弦波状磁場の場合($B^* : z = 0$ の磁場)について、安定な閉じ込めの検証を行い、「ミラー型磁場のような条件の下では閉じ込めが不安定である」との結論を出している。なお、このような木原の関与を考えると、本多研も含めて、東大グループの支援が理研における核融合研究室の体制確立に大きく寄与したものと推察される。

4.3 理研における核融合研究の確立

1963(昭和38)年11月になると、岡本耕輔が主任研究員に昇格する¹¹⁸⁾。このことによって集団指導体制は解消され、核融合研究は原子核部門の中に包含された。岡本は A-B 計画論争時に核融合研究委員会(通称「B 計画委」、委員長 山本賢三)の DCX 検討小委員会・委員長を務めており、理研の研究者の中でも、比較的早い段階から国内での核融合研究計画に参画していた。岡本が主任研究員に昇格したことによって、理研の核融合研究はこの段階で既に1970年代以降に続くプラズマ診断や加熱技術開発を中心とした研究方針を決定する。以下では、主要研究テーマごとにその動向を見ていく。

4.3.1 高エネルギーアーク装置による研究

1963年に完成した高エネルギーアーク発生装置は、後年に放電管や電極部の改善、22インチ油拡散ポンプの追加が行われ、炭素やアルゴン、ヘリウムなどによって生じたアークプラズマを測定対象として、マイクロ波、分光、各種探針によるプラズマパラメータの計測が行われた¹¹⁸⁾。

各年度における具体的な研究内容の概要を述べると、装置が完成した1963年度には、陰極を通してのアルゴンやヘリウムなどのガス流入量を変えることで、圧力を 10^{-1} mmHg から 10^{-5} mmHg まで変化させ、そこに電流(最大 250A)を流すことで発生したアークプラズマ

の性質を計測する作業が開始された。翌 1964(昭和 39)年からは、高エネルギーカーボンアークプラズマの測定が本格的に始まっている¹¹⁹⁾。実験では、陰極からアルゴンを放電支持ガスとして流入し、陽極(グラファイト丸棒)部管壁からのガス流量を変えることで陽極部アーク柱周辺の気圧を変化させて、プラズマの電子密度や電子温度、イオン温度などのパラメータを幾つかの方法で計測している。測定結果の一例を挙げると、電子密度は 75GC のマイクロ波(4mm マイクロ波¹¹⁹⁾)が常にカットオフになることから $6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ より大きく、また陰陽面電極を短絡して出来る減衰プラズマ密度の時間変化をマイクロ波での計測から外挿することによって、 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ であることが確認された¹²⁰⁾。なお、この結果は探針での測定結果とほぼ同様な値を示している。一方、電子温度は比抵抗、マイクロ波、探針、分光いずれの計測でも 10-20eV のあいだの値を示し、イオン温度は試作したエッセル分光写真器によるドップラー幅から、圧力が 10^{-5}Torr 付近で最高 20eV になることが算出された¹¹⁹⁾。これに引き続き 1965(昭和 40)年度には、高エネルギーカーボンアークにおける振動機構の研究を目的として、アーク電流やアーク周辺の静電界、 C^{++} イオンなどのスペクトル線強度の諸振動に関する周波数スペクトラムの測定が行われた。その結果、容器の圧力が $2.6 \times 10^{-3} \text{Torr}$ で 3 種類、 $2.6 \times 10^{-4} \sim 2.8 \times 10^{-5} \text{Torr}$ で 8 種類、いずれも 1MC 以下にピーク周波数を持つ合計 11 種類の振動が検出され、分散式から求めた関係と実験結果との比較から、これらをイオン音波とドリフト波と同定している¹²¹⁾。

このような高エネルギーアーク装置を用いた研究は、1968(昭和 43)年まで核融合研究室の主要テーマとして多くの研究課題が遂行された。なお、同装置を建設した目的を後に岡本は「測定対象のプラズマを得るため」と述べており¹⁰⁴⁾、核融合炉を目指した長時間のプラズマ閉じ込めを目的とする装置を理研グループが製作するという事は 1960 年代を通して行われていない。

4.3.2 マイクロ波・分光・探針に関する研究

既に記したように、プラズマパラメータの計測・測定は核融合研究室創設当初から主要研究テーマに置かれており、それは 1960 年代も変わらなかった。その中でも、核融合炉での計測のために、マイクロ波によるプラズマ診断技術の開発が核融合研究室における課題の一つとして位置づけられていたことは、岡本が「プラズマ中に物質を挿入することなく測る技術の確立を目的に、分光とマイクロ波の測定を始めた」¹⁰⁴⁾と後年に述べていることから判断できる。そして、マイクロ波による診断技術の中でも、特に自由空間法によって「干渉計あるいは散乱波強度の測定から電子密度を 10%以内の誤差で求める条件を実験で明らかにする」ことが重要課題として設定された。同方法の測定確度については、1965 年に塩原信司らによって、ガラス放電管中の低密度定常ヘリウムプラズマにおける電子密度の測定から確認が行われた。その結果、塩原は「マイクロ波はプラズマ中を伝搬する際に、その光路に沿っての波長変化が緩やかであり、プラズマ中で WKB 近似が成立するものと見なす」ことが出来て、さらに「電子の他粒子との衝突周波数がマイクロ波周波数と比較しても無視できて、また放電電流の振動が抑制できるならば、プラズマ円柱がマイクロ波ビーム幅の 2

倍以上の直径を有する場合に、90%以上の測定確度を期待できる」と結論している¹²²⁾。このほか、理研のマイクロ波物理研究室との共同研究が1965年度から開始され、マイクロ波でのプラズマ計測研究¹²¹⁾において、マイクロ波計測が困難な 10^{14}cm^{-3} の高電子密度計測のために、炭酸ガスレーザー干渉計や遠赤外線レーザー光検出器の研究開発も行われた¹²³⁾。

一方、分光計測については、1961年の高エネルギーアーク装置建設と同時に分光計測器の整備が始まり、対象が高輝度の定常プラズマであることに着目して、「スペクトルの波長および強度を精度良く計測すること」、また「スペクトル線の形を高分解能で計測すること」に主眼が向けられた¹¹¹⁾¹²⁴⁾。1962年度には「焼き出しのできる放電管」を用いて、ヘリウムガスおよび放電プラズマのスペクトル線観測が行われ、He I, II および不純物として存在する酸素、水素のスペクトル強度の時間的変化を調査し、プラズマ中の荷電粒子の状況を観察することで、特にHe Iのパルスの形からHe IIの再結合が存在することを確認している¹¹²⁾。そして、翌1963年には上述した高エネルギーカーボンアークプラズマ内の粒子の種類を中型水晶分光写真器で確認し、炭素イオン CII, CIII, CIV の存在を同定した。なお、同時に行われたファブリペローエタロン干渉計の測定から、CIIIのイオン温度が気圧の値によって大きく変化することも確かめられている¹¹⁸⁾。さらに1965年になると、エシェル分光写真器を使用してスペクトル線のドップラースラント効果を観測し、スペクトル線の傾きからアークプラズマ中のアルゴンおよびカーボンイオンの集団回転運動の速さ(CIIで最高値 $7 \times 10^5 \text{cm/s}$)を求めて、プラズマの安定磁界との関係が解析された¹²¹⁾。また、アルゴンとカーボンイオン線のドップラーシフトから、中性ヘリウムのスペクトル線強度を測定することで、ヘリウムアークプラズマでの代表的な電子温度として約 0.34eV を得ている。加えて、同1965年には分光測定のためのテストプラズマとしてPIG放電管が製作され、大型装置での計測の予備測定を行うとともに、分光診断の確立も計られた¹²¹⁾。

これに対して、プラズマ中に物質を挿入することになる探針を用いた計測の研究も1968年頃まで続けられた。例えば、1965年には回転式径方向移動探針によるアルゴンアークプラズマの中心や外周における電子密度、電子温度および陽極に対するプラズマの電位分布を測定している¹²¹⁾。計測の結果、気圧が $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{Torr}$ 、放電電流が200Aの時、電子密度はアーク柱軸上で約 10^{14}cm^{-3} 、電子温度は約 $2 \times 10^5 \text{K}$ と測られ、プラズマは完全電離の状態にあることが確認された。また、この時の電子密度は「アーク中心より径方向にゆるやかな勾配を示すが、気圧が低下するにつれて径方向の勾配は急になる」こと、さらに電子温度が「圧力 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{Torr}$ では中心より径方向にあまり変化しないものの、 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{Torr}$ になると中心付近に温度の高い部分が集中し、それより外側は中心より低い一様な温度を示す」ことが見出された。そして、「気圧が低くなるにつれて電子の密度や温度もアークの中心部に集中する」との判断がなされ、「電位分布は気圧が低くなるにつれてピークの位置が中心部へ移動し、このことはスペクトル測定のスラント効果が原因である」と考えられた。このような探針による計測は、電子密度などの計測といった直接的な使用以外にも、マイクロ波と探針との計測結果の比較にも用いられ、その成果は1965年にベオグラードで行われた第7

回電離気体現象国際会議(The Seventh International Conference on Phenomena in Ionized Gases)で報告されている¹²⁵⁾。

4.3.3 プラズマ加熱や真空技術に関する研究

プラズマ加熱に関しては、研究室設立当初から高周波磁場によるプラズマ加熱の方法が研究されていたが、1962年以降1966年までは研究課題として登場しなくなる。しかし1967(昭和42)年度になると、CW(連続波)マグネトロンをマイクロ波発振源として使用し、円形導波管内の $30\phi\text{ mm}$ 石英放電管にヘリウムを $10^{-3}\sim 10^{-5}\text{ Torr}$ の圧力下で封入し、これを一様なサイクロトロン共鳴磁場中に置くことでプラズマを作るという「電子サイクロトロン共鳴加熱」の研究が開始された。その後は1968年にミラー磁場中のプラズマに対する高電力マイクロ波や電子ビームを用いた加熱実験が、さらに1970年度からは、飽和蒸気圧に近い高压ガスを低気圧中に噴出した後に断熱膨張させることで、クラスター粒子(数百から数万個の原子からなる巨大分子)の流れをつくり、真空中でのクラスター粒子束のイオン化と高エネルギー化を実現しようとする「クラスター粒子源」の研究も始まった¹²⁶⁾。

真空技術に関しても、研究室が設立された時より研究課題に加えられており、到達真空度での残留ガスの分析などが行われた。また不銹鋼容器を焼き出して吸着ガスを減らし、油の逆拡散防止を考慮した油拡散ポンプ系を用いることで、1962年に $6\times 10^{-10}\text{ Torr}$ の超高真空を達成している¹¹⁵⁾。さらに1965年になると、装置壁の吸着ガスの放出を減少させることが研究課題として設けられ、電子衝撃による金属面からのガス放出の測定調査も行われた。

4.3.4 所外研究機関との共同研究

核融合研究に関する所外研究機関との共同研究も、1960年代に入ると活発になった。理論部門では川上一郎(日本大学)と佐藤正知(日本大学)らを所外研究員として迎えたほか、原研の核融合研究グループとは、プラズマ・ガン研究を支援することを目的として、本章2節でも記したようにマイクロ波によるプラズマ入射測定やプラズマ加熱に関する共同研究が行われた²⁵⁾。そのため、岡本や円城寺博は1967年8月19日から原研の核融合研究委員会委員も務めている¹²⁷⁾。

1969(昭和44)年度に入ると、「核融合研究開発基本計画」への参画にともない、理研の核融合研究室はそれまでの経歴から「プラズマの生成、加熱と診断および真空技術」および「トラス磁界装置の研究開発の関連技術開発」の一部を担当することになった¹²⁸⁾。同年には早速、原研のJFT-1ヘキサポール磁場実験に関連して、マイクロ波によるプラズマ測定およびプラズマの生成が研究課題として取り上げられた。

この時期の理研における計測・加熱に関する技術の高さや理研との共同研究の重要性は、吉川庄一が当時提出した原研の将来計画に関する報告書からもうかがえる¹²⁹⁾；

原研の最初の目標は勿論可なり大きな総合装置を作り、それを土台にしてより大きな装置に向かい、その間に体制(即ち人)を整える事にあるわけで、現在のCapacityから言っても、附属的な実験、測定技術の開発等に迄此の数年間手が廻らない事は略確実であるし、寧ろ勢力を分散するという意味で望ましくない。

そのような附属的実験を行うグループとして、理研グループは一番適していると考えられる。特に真空技術、分光測定(Laserを含めて)は基礎的な問題として、その研究成果が、欧米の水準に追いついていないからといって規模を縮小するのには反対である。寧ろそのような仕事を地道にやってくれるグループがある事は歓迎すべき状態である。唯、或る程度プラズマ物理で必要な、技術に重きをなすように向ける努力が必要である。・・・

次に、マイクロ波関連の加熱、干渉計測定は、理研の今迄の実績もあり、原研で積極的に利用するべきであろう、その傾向に行っている事は非常に望ましい、プラズマのマイクロ波加熱の結果、どのような電子エネルギー分布を得られるかは、測定出来たら、将来トラス実験の時に利用出来ると思う。

以上の(i)真空、(ii)分光、および(iii)マイクロ波は理研のグループの特色を良く生かして、成果も上げられていると思う。

理研との共同研究は、その後も原研を中心として行われていたが、1970(昭和45)年度には電総研にも流動研究員が派遣され、トロイダルスクリーピングの分光測定にも協力している¹³⁰⁾。

4.4 研究室から見た理研の核融合研究

理研における核融合研究は、よく知られたサイクロトロン研究を始めとする原子核物理学の一環として開始されることになった。その際、研究方針としては当初から閉じ込め研究ではなく、計測や関連技術などの基礎的な研究を重視する立場が取られていた。後に3研の中で、計測や関連技術の研究開発に従事するという日本の核融合研究における「縁の下の力持ち」という位置を勤め上げるに到った経緯は、研究室発足当初からの方針が大きな影響を与えていたといえる。

ここで、核融合研究室におけるプラズマ計測、特に1960年代の探針による計測研究に関連して、理研内部の他の研究室、特に「電気材料研究室」およびその後身である「プラズマ物理研究室」における研究との関係について触れたい。電気材料研究室は、1963年に宮田研の流れを受けて発足した研究室で、その起源は核融合研究室とほぼ同じである。研究テーマとしては、ロケットによる電離層プラズマの観測プローブ開発やMHD発電における熱電子放射の測定などが設定された。その後、1970年に小島昌治が東京教育大学(現在の筑波大学)教授との兼任で主任研究員に就任したことによって、研究室の名称は「プラズマ物理研究室」に改称されたが¹³¹⁾、探針についての研究は継続され、さらにガスレーザープラズマ、プラズマジェット等の研究が追加された。なお、前身である宮田研の頃から電離層プラズマ観測に関する研究には力が入れられており、一例を挙げると、同研究室の一宮虎雄や土手敏彦は1960年9月に日本電信電話株式会社電気通信研究所の高山一男と共同で、探針による宇宙電離層のプラズマ観測に関する研究を行っている¹³²⁾。

注目すべき点は、理研内に探針によるプラズマ計測の研究を行っていた研究室が独立に2

つ存在するということである。原研や電試においても、理研の電気材料研究室のように、宇宙空間プラズマの計測に関する研究は行われていたが、それは核融合研究と同じ部署・研究室内で遂行されていた。なお4-3-2でも触れたように、核融合研究室はマイクロ波やレーザー計測の研究に関して、マイクロ波物理研究室との共同で研究開発を行っている。しかしその一方で、探針について電気材料研究室(プラズマ物理研究室)と共同研究を行ったという直接的な記録はない。現に、例えば1965年の『核融合研究』に掲載された核融合研究室の三好昭一、塩原信司、坂本雄一の論文では、土手らの論文を発展させて探針による電子密度を測定する研究をプラズマ物理研究室と独立に行っている¹³³⁾。また、ラングミュア探針によって高エネルギーアーク装置の電子密度、電子温度、プラズマ電位の測定も核融合研究室単独で行われていた¹³⁴⁾。

ここには、4.1.1で述べた「プラズマ中に物質を挿入することなく測る技術の確立を目的に、分光とマイクロ波の測定を始めた」¹⁰⁴⁾という岡本の考えが深く影響していたと考えられる。そもそも探針による計測は、古典的方法でありながらも簡便的な方法として広く利用されていた。特長は探針挿入によりプラズマの擾乱が局所的で、空間的分解能がよく、空間電位やエネルギー分布などが容易に測定できることである¹³⁵⁾。しかしその反面、タングステンなどを用いた tip がプラズマと接触してしまうので、高温高密度のプラズマでは tip が溶けて不純物がプラズマ中に流れ出してしまう、プラズマの温度低下やひどい場合にはプラズマを壊してしまう可能性がある。またこの他にも、磁場中の電子が探針に飛び込んでくることで、電子の軌道が曲げられてしまうことも問題となる。これに対して、マイクロ波による計測(およびレーザーによる計測)は、プラズマ中に挿入するものが無いために、プラズマに直接的な影響を与えない点で探針計測よりも核融合炉における計測に適している。そのため、岡本の考えにもあるように、理研の核融合研究室では当初から核融合反応のための高温プラズマを対象としたマイクロ波による診断・計測に重点がおかれ、探針に関する診断・計測を主だった研究テーマとはしていなかった。これに対して、電気材料研究室(プラズマ物理研究室)は、「プラズマ特性の測定方法として、この分野の研究の基礎となる探針測定法を開発する」ことを主要目的の一つとしており、核融合研究室と研究目的の面で立場が大きく異なっていた。このような目的の違いが、核融合研究室と電気材料研究室(プラズマ物理研究室)との間の共同研究が主だつてに行われていなかった一因であると考えられる。これは換言するに、理研の核融合研究は開始当初より基礎研究重視の立場をとっていたが、そこには「核融合」を念頭に据えた基礎研究という姿勢が貫かれていたといえる。

1970年代以降の理研の核融合研究についても簡単に述べると、計測や加熱などの関連技術に関する研究は1970年代に入っても継続されたが、1977(昭和52)年3月に岡本耕輔が定年退官すると、研究方針が徐々に変わっていくことになる。1979(昭和54)年度より、核融合研究室は分光計測を中心とした高温プラズマの計測技術の開発に重点を置く研究室として再発足し、主任研究員は森一夫が務めることになった¹³⁶⁾¹³⁷⁾。1982(昭和57)年になると、西独ユーリッヒ研究所のTEXTOR計画への研究協力として、研究者3名を派遣するなど国際

協力にも貢献したほか、国内でもプラズマ研の JIPPT-II の放電洗浄を行うなどの共同研究を実施している¹³⁸⁾。しかし同時期になると、3 研の中で原研が核融合研究の主幹を本格的に担うこととなり、理研の核融合研究室は大きな編成換えを行うことになった。これにより、研究室所属の研究員はプラズマ物理研究室の所属となり、それとは別に加速器利用の原子の動的過程に関する研究を主体とする原子過程研究室(主任研究員 渡辺力)が発足した¹³⁹⁾¹⁴⁰⁾。結果として、プラズマ物理研究室に吸収される形で、1982(昭和 57)年度に理研の核融合研究室はその役割を終えることとなる¹⁴¹⁾。

5. 本章のまとめ

以上、本章では「核融合研究開発基本計画」に参画した原研、電試、理研の核融合研究に関する研究のはじまりと経緯について見てきた。原研、電試、理研の 3 研を横断的に比較すると、核融合研究を所内の研究課題として取り上げた時期は 1950 年代でほぼ一致している。しかし、そのバックグラウンドを見てみると、電試はそれまでに所内で行われていた避雷針や放電に関する研究をそのまま展開する形で核融合研究を開始し、研究体制が 1957 年と 3 研の中でいち早く確立している。その一方で、原研と理研は核融合研究の開始年数が電試よりも約 1 年程度遅れてはいるものの、1965 年頃からは既に計測に関して共同研究を開始していた。その結果、1968 年の「核融合研究開発基本計画」の遂行に際して、いち早く共同研究体制が確立できたものと考えられる。1965 年頃より共同研究が開始された理由としては、原研の核融合研究室発足が 1965 年度で、電試や理研とは研究の体制面で明らかな遅れがあったこと、さらに、1964(昭和 39)年 6 月に原研理事長に就任した丹羽周夫が「原研は動力炉開発を主目的にするべき」¹⁴²⁾であるという方針を打ち出し、基礎研究の縮小、さらには「原研の核融合研究を理研へ引き取って欲しい」¹¹⁾という考えを持っていたらしく、発足したばかりの核融合研究室において計測部門の研究拡張が困難であったことが挙げられる。

他方、3 研が「核融合」を研究課題として取り上げた頃、本稿第 2 章で述べたように B 計画の先送りが決定し(1959 年)、基礎研究を推し進めることが、核融合懇談会を中心とする研究者コミュニティのなかでのコンセンサスとして構築されていた。研究内容だけを見れば、3 研も 1960 年代半ばには基礎研究重視の路線を取っているように見られる。しかし、3 研の基礎研究には「将来的な中型装置・大型装置の研究に向けた地ならし」という意味合いが、かなり強調されている点は見逃せない。例えば、原研でのプラズマ・ガン研究開始の背景には、「将来に予想されるプロジェクト的核融合研究の段階の準備になること」¹⁶⁾という考えが踏まえられており、電試においても 1967 年度の研究計画には「磁界によって超高温プラズマを長時間・安定に保持する装置の開発、核融合反応によって発生するエネルギーの利用を可能にする、という目標で長期にわたり基礎的研究を行っている」とある⁸⁴⁾。理研は計測や関連技術などの基礎的な研究を遂行してきたが、「このことを通じてプラズマの性質をよく知り、核融合プラズマに一步でも近い高温・高密度で保持時間の長いプラズマを作ること」を研究目的の中に併記していた¹⁰⁵⁾。3 研が基礎研究を開始したきっかけは、第 2 回ジュネ

ーブ会議が開催された頃の世界的な研究の趨勢(基礎研究への回帰)や各機関内で行った研究の行き詰まり(特に、電試)などではあるが、だからと言って、本稿第2章で取り扱った「B計画」的な考え方が軽んじられたわけではなかったといえる。特に、原研の森茂や田中正俊、笹倉浩、電試の森英夫、理研の岡本耕輔はB計画委の委員を務めており、3研の中にB計画で提示されたような中型装置による核融合研究の必要性を認識していた研究者がいたということは、「いずれは行われるであろう中型・大型装置でのプラズマ閉じ込めに関するプロジェクト研究」が3研において展開された核融合研究の念頭に置かれる一つのきっかけになったといえるだろう。

このように、1950年代から60年代における原研、電試、理研の核融合研究に貫かれていた「核融合」をねらった研究方針や研究所間での共同研究、さらにはB計画の哲学といったものが、結果として「核融合研究開発基本計画」のバックボーンになったといえ、これらによって、1970年代以降に展開された科技庁原子力予算に基づく国家プロジェクトとしてのプラズマ閉じ込め研究の礎が構築されるに至ったと考えられる¹⁴³⁾。

本章では、1960年代までの3研における核融合研究開発黎明期の歴史を見てきた。なお、各研究機関における1970年代以降の核融合研究の大まかな流れも併記したが、70年代以降の詳細な歴史については別稿にて議論したい。例えば、1968年以降の電試における高ベータ研究の目的が、原研トカマク研究の高ベータ化を踏まえての研究であったのか、またはトカマクの代替装置としての高ベータ装置の考案であったのか等が調査項目として挙げられる。また1965年以降、核融合研究者のコミュニティ内でたびたび登場する「新研構想」においても、3研は深く関わりを持っている。例えば、1965年12月より発足した日本学術会議核融合特別委員会の下部組織である第2次将来計画小委員会では、「3研を土台とした新研構想」が出されている。この動向についても、日本における核融合研究体制の変遷をうかがい知ることのできる出来事の一つであり、今後の研究事項として挙げられる。さらに科技庁との比較対象として、プラズマ研や東芝、日立などの民間企業における黎明期の核融合研究開発史調査も今後の研究課題として挙げられる。

文献と注釈

- 1) 山田雅章「核融合研究40年の光と影」、『電気學會雑誌』第112巻第11号(1992年)、885-893頁。／植松英穂、竹田辰興、西尾成子「日本における核融合研究の歴史」、『日本物理学会誌』第56巻第6号(2001年)、395-402頁。／宮本健郎「核融合をめざしたプラズマの研究」、『日本物理学会誌』第51巻第8号(1996年)、549-556頁。／早川幸男、木村一枝「核融合研究事始め(1)」、『核融合研究』第57巻第4号(1987年)、201-214頁。／同「核融合研究事始め(2)」、『核融合研究』第57巻第5号(1987年)、271-279頁。／同「核融合研究事始め(3)」、『核融合研究』第57巻第6号(1987年)、364-378頁。
- 2) 山本賢三『核融合の40年—日本が進めた巨大科学—』ERC出版、1997年、111頁。
- 3) 例えば、3研究機関についての核融合研究開発に関する歴史研究としては、上記1)と2)

に挙げた文献以外にも、吉岡斉の先行研究が挙げられる：吉岡斉「核融合研究の本格的展開」、中山茂他編集『[通史]日本の科学技術 4 転形期 1970—1979』、学陽書房、1995年、193-206頁。

- 4) 日本原子力研究所に関する核融合研究開発の歴史は、以下を参照のこと：前掲3)．／西尾成子『核融合研究の歴史 委託調査報告書』、日本大学理工学部、1995年、13-56頁．／谷口哲也「特殊法人日本原子力研究所に於ける核融合研究の始まり」、日本大学理工学部修士論文、1990年．
- 5) 『原研10年史』、日本原子力研究所、1966年、150-151頁(9.3 核融合の研究)．
- 6) 『第2回ジュネーブ会議総合報告・金属編／物理編／化学編／原子炉編／原子力工学編／保健物理編』(JAERI-memo 4007-4012)、日本原子力研究所、1958-1959年．
- 7) 山本賢三、森茂「第三回B計画研究会報告(昭和34年7月18日)」、『核融合研究』第3巻第2号(1959年)、186-208頁．
- 8) 「吉川君ゆうべ渡米 カナダ杯基金の原子力留学生」、読売新聞 1958年9月6日朝刊7頁．
- 9) 『日本原子力研究所年報 昭和33年度』、日本原子力研究所、1958年、85頁(第7表 職員の海外派遣)．
- 10) 『日本原子力研究所年報 昭和35年度』、日本原子力研究所、1960年、76-77頁(組織図)．
- 11) 「森茂氏インタビュー」、2011年3月10日@日本原子力研究開発機構東京事務所、参加者：井口春和、木村一枝、松田慎三郎、吉田英俊、雨宮高久(NIFS Archives ID: 100-10-01)．
- 12) 前掲10)、42頁(6.10 核融合反応)．
- 13) 当時、M.I.T.にいた吉川庄一は、この時の経緯を知らずにPIG(P-4)装置を作る際の助言を森宛の手紙の中で述べている：「海外通信 吉川庄一→森茂」1961年3月25日付、『核融合研究』第7巻第2号(1961年)、159-160頁．
- 14) 山本賢三、森茂「欧米の現状(III)」、『核融合研究』第5巻第5号(1960年)、540-548頁．／同「欧米の現状(IV)」、『核融合研究』第5巻第6号(1960年)、640-658頁．
- 15) 原研における直接発電グループも、核融合研究とほぼ同時期である1961年度から開始され、研究班長は矢野淑郎が務めた．森は米国視察の際に各機関のMHD装置も同時に視察しており、直接発電研究グループの発足に際しての議論にも参加している．1960年には、直接発電の検討に核融合グループからアイデアを提供するといった協力も行われた．
- 16) 日本原子力研究所研究部核融合研究室『原研における核融合研究の報告書(JAERI-memo No.2798)』、日本原子力研究所、1967年．
- 17) 『日本原子力研究所年報 昭和36年度』、日本原子力研究所、1961年、37頁(核融合)および78-79頁(工作工場)．

- 18) 『日本原子力研究所年報 昭和 37 年度』, 日本原子力研究所, 1962 年, 16-17 頁(核融合).
- 19) 核融合直接発電研究準備室(核融合グループ)『同軸型プラズマ・ガンの研究(JAERI-memo 1077)』, 日本原子力研究所, 1965 年.
- 20) 『日本原子力研究所年報 昭和 38 年度』, 日本原子力研究所, 1963 年, 13-17 頁(核融合).
- 21) 『日本原子力研究所年報 昭和 39 年度』, 日本原子力研究所, 1964 年, 44-45 頁(核融合).
- 22) 『日本原子力研究所年報 昭和 40 年度』, 日本原子力研究所, 1965 年, 54-55 頁(核融合).
- 23) 『日本原子力研究所年報 昭和 41 年度』, 日本原子力研究所, 1966 年, 63-65 頁(核融合).
- 24) 『日本原子力研究所年報 昭和 42 年度』, 日本原子力研究所, 1967 年, 65-67 頁(核融合).
- 25) 坂本雄一, 塩原信司, 岡本耕輔, 河島伸樹, 国枝俊介, 森茂「プラズマ・ガンで磁場中に入射されたプラズマのマイクロ波との相互作用」, 『日本物理学会第 21 回年会講演予稿集』第 21 巻第 1 号 (1966 年), 317 頁.
- 26) 笹倉浩, 市川芳彦「プラズマ内の輸送現象(1)」, 『核融合研究』第 5 巻第 5 号 (1960 年), 518-538 頁. / 田中正俊「プラズマ波の excitation」, 『核融合研究』第 5 巻第 6 号 (1960 年), 598-603 頁.
- 27) M.Tanaka, “Ion Cyclotron Resonance Heating of an Inhomogeneous plasma column,” *Res. Report of the Institute of Plasma Physics (Nagoya University, IPPJ-37, 1965)*.
- 28) 前掲 16), 17 頁.
- 29) 河島信樹「ダブル・プローブによるプラズマ流のイオン温度測定」, 『核融合研究』第 15 巻第 4 号 (1965 年), 413-419 頁.
- 30) 河島信樹『宇宙・プラズマ・核融合 宇宙の創造と再現に挑む』, 工業調査会, 1982 年.
- 31) 『原研二十年史』, 日本原子力研究所, 1976 年, 66-71 頁(第 10 章 核融合研究開発の新段階).
- 32) 前掲 2), 105-109 頁.
- 33) 「核融合専門部会資料「昭和 43 年度対称性トーラスの予備実験の実施について」(研究小委員会山本賢三→核融合専門部会長菊池正士宛), 昭和 43 年 2 月 20 日付」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:002-14-35).
- 34) 前掲 31), 122-129 頁(第 7 章 核融合に関する研究).
- 35) 森茂「解説 核融合」, 『原研』第 24 号 (1967 年), 12-13 頁.
- 36) 松田慎三郎(東工大特任教授)との私信(2011 年 2 月 24 日).
- 37) 『日本原子力研究所年報 昭和 43 年度』, 日本原子力研究所, 1968 年, 1-2 頁(概況)お

- よび 60-62 頁(核融合).
- 38) 田中正俊, 田村早苗, 森茂「マルチポール系におけるプラズマの平衡」, 『日本物理学会第 24 回年会講演予稿集』第 24 巻第 2 号 (1969 年), 96 頁. / 田中正俊, 森茂「直線マルチポール磁場におけるプラズマの平衡」, 『核融合研究』第 23 巻第 3 号 (1969 年), 173-182 頁 等.
 - 39) 国枝俊介, 田村早苗, 井上堅司, 河島信樹, 田中正俊, 森茂「直線型マルチポール磁場へのプラズマ入射(1)」, 『日本物理学会秋の分科会講演予稿集』第 1 号 (1968 年), 122 頁 等.
 - 40) 田中正俊, 井上堅司, 田村早苗, 国枝俊介「原研トーラス型ヘキサポール」, 『日本原子力学会誌』第 10 巻第 10 号 (1968 年), 594-596 頁.
 - 41) 松田慎三郎, 田村早苗, 大和春海「JFT-1 によるプラズマ閉込めの実験」, 『日本原子力学会誌』第 11 巻第 12 号 (1969 年), 747-749 頁.
 - 42) 『日本原子力研究所年報 昭和 44 年度』, 日本原子力研究所, 1969 年, 1-3 頁(概況)および 59-61 頁(核融合).
 - 43) 『日本原子力研究所年報 昭和 45 年度』, 日本原子力研究所, 1970 年, 16-18 頁(原子力特定研究)および 111-113 頁(核融合).
 - 44) 森茂「核融合炉, トーラス国際会議に出席して」, 『日本原子力学会誌』第 11 巻第 12 号 (1969 年), 750-752 頁.
 - 45) S.Tamura, H.Yamato, T.Nagashima, M.Yoshikawa, H.Ohtsuka, T.Sugawara, T.Shiina, S.Matsuda, S.Mori, “Plasma Confinement in the JAERI Hexapole with high toroidal field,” *PROCEEDINGS SERIES: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1971*, Vol.1 (Vienna: IAEA, 1972): 75-84.
 - 46) A-B 計画論争については, 本稿第 2 章を参照. また, 宮本梧楼の B 計画の考え方については, 本稿第 2 章および下記を参照のこと: 雨宮高久「プラズマ・核融合研究開発史再考—核融合専門部会での B 計画に関する議論の動向—(22pRE-4)」, 『日本物理学会講演概要集』第 66 巻第 2-2 号 (2011 年), 358 頁.
 - 47) 伊藤智之, JFT-2 グループ「中間ベータ値トーラス装置(JFT-2)の試験運転結果」, 『日本原子力学会誌』第 14 巻第 8 号 (1972 年), 451-453 頁.
 - 48) 前掲 31), 66-71 頁.
 - 49) 『原研四十年史』, 日本原子力研究所, 1996 年, 30-37 頁.
 - 50) 電気試験所創設時に関しては, 以下を参照のこと: 鎌谷親善「創始期における電気試験所」, 『科学技術史』第 2 号 (1998 年), 1-52 頁.
 - 51) 『電試ニュース』第 83 号 (1956 年), 1-3 頁.
 - 52) 電気試験所機器部プラズマ研究室『電試における核融合研究の報告書』, 1967 年 8 月, 3 頁.
 - 53) 『電試ニュース』第 91 号 (1957 年), 3-4 頁.

- 54) 川俣修一郎「核融合反応に関する研究」,『電気試験所記念論文集(七十周年記念)』, 1963年, 51-56頁.
- 55) 『電試ニュース』第100号(1958年), 1-7頁.
- 56) 『電試ニュース』第114号(1959年), 1-7頁.
- 57) 前掲55), 8-9頁.
- 58) 「各部課研究討論会 昭和33年1月~4月」,『電気試験所彙報』第22巻第8号(1958年), 78-80頁.
- 59) 小沢正義「ミシガン大学および欧米の研究所—プラズマの研究さまざま—」,『電試ニュース』第131号(1961年), 5-7頁.
- 60) 『電試ニュース』第126号(1960年), 5-7頁.
- 61) Tasaburo Yamada et al., “The theta pinch device of the Electrotechnical Laboratory in Japan,” *Bulletin of the Electrotechnical Laboratory* 26(2)(1962): 51-66.
- 62) *Nuclear fusion : Proceedings of the Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 4-9 September 1961, Salzburg, Austria, Nuclear Fusion 1962 Supplement, Part.3* (Vienna: IAEA, 1962-63): 1122-1124.
- 63) 詳細は, 本稿第4章を参照.
- 64) 木原太郎「プラズマ物理核融合会議報告」,『核融合研究』第7巻第4号(1961年), 329-332頁.
- 65) 川俣修一郎「空心トーラスの設計について」,『電気試験所彙報』第24巻第10号(1960年), 28-34頁.
- 66) 『電試ニュース』第160号(1963年), 7頁. / 杉浦賢 他「逆転安定磁界を使ったプラズマ閉じ込め装置(その1)」,『電気試験所彙報』第28巻第1号(1964年), 50-60頁. / 杉浦賢 他「逆転安定磁界を使ったプラズマ閉じ込め装置(その2)」,『電気試験所彙報』第28巻第5号(1964年), 20-26頁.
- 67) 『電試ニュース』第148号(1962年), 7-8頁.
- 68) 工業技術院電子技術総合研究所『電子技術総合研究所最近の十年史 創立80周年記念誌 昭和46年』, 電子技術総合研究所, 1981(昭和56)年10月31日, 145頁.
- 69) Ibid., 164頁.
- 70) 矢作栄一, 山下栄吉「ミリ波によるプラズマ電子密度の測定」,『電気試験所彙報』第24巻第12号(1960年), 925-937頁.
- 71) 「試験研究機関: 電気試験所」,『工業技術院年報 昭和40年度』(1965年), 462-463頁および474-475頁.
- 72) 「モスバーグ博士—当所で長期滞在研究」,『電試ニュース』第223号(1968年), 11-12頁.
- 73) 弘田公 他「高温プラズマの分光測定(その1)実験装置」,『電気試験所彙報』第31巻第7号(1967年), 7-12頁. / 弘田公「高温プラズマの分光測定(その2)基礎実験」,『電気試

- 験所彙報』第31巻第7号(1967年), 13-18頁.
- 74) E.Yahagi, "Some Advanced Techniques for the Measurement of Microwave Phase-shift," *Diagnostic methods and applications: Proceedings of the seventh International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Beograd, 22-27 August 1965 / edited by B. Perović and D. Tošić, Vol.III (Gradevinska Knjiga, 1966): 101-105.*
- 75) 『電試ニュース』第201号(1966年), 4-7頁.
- 76) 『電試ニュース』第224号(1968年), 4-8頁.
- 77) 木山浩子, 木山学, 小川潔, 田丸健「電離層および磁気圏プラズマの模擬」, 『電気試験所彙報』第33巻第8号(1969年), 43-61頁.
- 78) 同テータピンチ装置を建設するために, 電試内では井口正之や杉浦賢らによって, ギャップの寿命や並列運転などの検証実験が行われた: 杉浦賢, 井口正之, 池田長康「ケーブルの充放電による急峻な高電圧多パルスの発生(マスター・ギャップ)」, 『電気試験所彙報』第31巻第3号(1967年), 28-40頁. / 杉浦賢, 井口正之, 池田長康「25個のギャップの並列運転」, 『電気試験所彙報』第31巻第3号(1967年), 41-51頁. / 杉浦賢, 池田長康, 井口正之「ケーブルの沿面閃絡とその防止に関する実験」, 『電気試験所彙報』第32巻第10号(1968年), 34-42頁. / 井口正之, 杉浦賢, 竹田昭平「火花ギャップの寿命試験」, 『電気試験所彙報』第32巻第10号(1968年), pp.43-53.
- 79) 与世里盛宏 他「テータピンチプラズマのレーザ診断」, 『電気試験所彙報』第32巻第3号(1968年), 35-44頁.
- 80) 前掲2), 106頁.
- 81) 『電試ニュース』第236号(1969年)9月, 1-4頁. / 杉浦賢 他「100kJの速い θ ピンチ装置」, 『電気試験所彙報』第33巻第10号(1969年), 12-22頁.
- 82) 前掲68), 165-166頁.
- 83) S.Kiyama, K.Ogawa, "Conditions and mechanism of theta-pinch plasma heating," *PROCEEDINGS SERIES: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1971, Vol.3 (Vienna: IAEA, 1971): 303-309.*
- 84) 『電試ニュース』第209号(1967年), 7-11頁.
- 85) 前掲68), 166-167頁.
- 86) 前掲68), 168頁.
- 87) 森英夫「電子技術総合研究所彙報の発刊に寄せて」, 『電子技術総合研究所彙報』第34巻第7号(1970年), 1頁.
- 88) 前掲68), 42-44頁.
- 89) 『電総研ニュース』第257号(1971年)6月, 3-5頁.
- 90) 山田太三郎「電力技術の研究—私の辿った道」, 通商産業省工業技術院電子技術総合研究所エネルギー関連親睦会田友会編『先輩から後輩へ エネルギー研究者へのメッセージ—新しい未来の建設のために』, パワー社, 1995年, 3-35頁. 同書では自身が関わった核

融合研究についても触れており、上述した第 1 回 IAEA 会議で報告されるはずであった 1960 年前後の電試のテータピンチ研究についてもエピソードが紹介されている；

・・・当時我々も Impulse Current Generator を使った Theta Pinch の研究を進行していたが、プラズマ安定性確保の一手段として逆磁界を加える方法を研究し、その設計を我国の“核融合研究会”に発表した。その際の論文の末尾に、昭和 36 年 3 月末完成と記したつもりが誤植のため、昭和 36 年 3 月末完成となっており、然もそれが実体であった為、会合参加者一同の大笑いを招いたのである。

しかし、第 1 回 IAEA 会議に出席しなかった理由については記されておらず、会議欠席の明確な理由を判断できる史料は、本稿執筆時には発見できていない。

- 91) 「第 2 回核融合懇談会議事録」、『超高温研究資料』第 1 巻第 12 号 (1957 年), 14-15 頁. / 電気試験所融合研究班「“電気試験所における核融合反応に関する調査研究について”昭和 32(1957)年 10 月 19 日」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID 301-14-01).
- 92) 「核融合懇談会プログラム」、『超高温研究資料』第 2 巻第 2 号 (1958 年), 23-24 頁. / 山田太三郎, 三田昇, 鶴見策郎, 川俣修一郎「600kA 衝撃電流発生について」, 『超高温研究資料』第 1 巻第 7 号 (1957 年), 54-56 頁.
- 93) 『電試ニュース』第 104 号 (1958 年), 8 頁.
- 94) 『電試ニュース』第 95 号 (1957 年), 4-6 頁.
- 95) 『電試ニュース』第 193 号 (1966 年), 1-2 頁.
- 96) 山田太三郎「電気技術の将来」, 『電気試験所彙報』第 31 巻第 1 号(工業技術院電気試験所創設 75 周年記念特集) (1967 年), 1-16 頁.
- 97) 『電試ニュース』第 143 号 (1961 年), 1-4 頁.
- 98) 『電試ニュース』第 150 号 (1962 年), 6-7 頁. : 森英夫「MHD 発電方式に関する研究について」, 『電気試験所彙報』第 27 巻第 7 号(研究 : MHD 発電特集) (1963 年), 1 頁.
- 99) この結果, MHD 発電に関する研究は大学・国公立研究所および民間が協力し, 強力に推進される事となり, 7 年間に約 156 億円の国費を投入して実用化する計画が組まれた : 『電試ニュース』第 198 号 (1966 年), 1 頁.
- 100) Ibid., 1-4 頁.
- 101) 植松英穂, 榎本亮「核融合用超電導磁石開発史」, 『物理学史ノート』第 6 号 (2000 年), 32-47 頁.
- 102) 平野洋一, 榎田創, 小口治久「逆磁場ピンチの歴史, 現状, その展望～産業技術総合研究所の逆磁場ピンチ研究の終結にあたって～」, 『プラズマ・核融合学会誌』第 87 巻第 6 号 (2011 年), 382-411 頁.
- 103) 理化学研究所創設期に関する歴史は, 以下に記す広重徹の著書や板倉聖宣と八木江里の論文, もしくは理化学研究所の年史を参照のこと : 広重徹『科学の社会史』, 岩波書店, 2002 年. / 板倉聖宣, 八木江里「理化学研究所の設立期における科学研究体制(1)」, 『科学史研究』第 41 号 (1957 年), 5-13 頁. / 同「理化学研究所の設立期における科学研究

- 体制(2)」、『科学史研究』第 42 号 (1957 年), 22-28 頁.
- 104) 岡本耕輔「理化学研究所における核融合の研究」, 『理化学研究所ニュース』第 22 号 (1970 年), 1-2 頁 <http://www.riken.jp/~media/riken/pr/publications/news/1970/m197007.pdf>.
- 105) 理化学研究所『理研 50 年』, 理化学研究所駒込研究所, 1967 年.
- 106) 「第 55 回理化学研究所学術講演会プログラム」, 『理化学研究所報告』第 35 巻第 6 号 (1959 年), 1-7 頁(記事).
- 107) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所報告』第 36 巻第 1 号 (1960 年), 137 頁.
- 108) A-B 計画論争時には提出された「研究体制についての意見」(『核融合研究』第 2 巻第 3 号 (1959 年), 315 頁) に理研の核融合研究室から以下の意見が出されており, ここでは基礎研究を重視させた方が良いという考え方が見受けられる ;
- ・・・研究体制に就いては基礎的研究を重視する A 計画と実際に中型装置を建造して行く B 計画との並行が望ましいが, B 計画(新しい着想による)をすぐ行う事は無理だから順次研究を進めて行くうちに並行するようにしたい. A 計画, B 計画何れかをと云う事になれば A 計画で行きたい・・・.
- 109) 森一夫は, 1959 年に東大工学部の神山雅英と核融合反応に対する分光学的測定について総合報告を書いており, 東大グループと計測の面でも共同研究が盛んに行われていたことがうかがえる: 神山雅英, 森一夫「高温度の分光学的測定—主として核融合反応に対して—」, 『応用物理』第 28 巻第 1 号 (1959 年), 1-9 頁.
- 110) 理化学研究所「超高温プラズマ発生装置研究会報告—高温プラズマ発生装置」, 『核融合研究』第 2 巻第 2 号 (1959 年), 158-164 頁.
- 111) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所報告』第 37 巻第 1 号 (1961 年), 56 頁.
- 112) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所報告』第 38 巻第 1 号 (1962 年), 126 頁.
- 113) 「原子力平和利用委託研究費」は, 理研における核融合研究の中では, 一貫して高温プラズマ現象の測定に関する研究にのみ使用された. 1968(昭和 43)年度までの理研の核融合研究室予算の変遷は下図のようになる(出典: 理化学研究所核融合研究室『理研における核融合研究の報告書 核融合研究委員会資料』, 1967 年, 3 頁から作成).

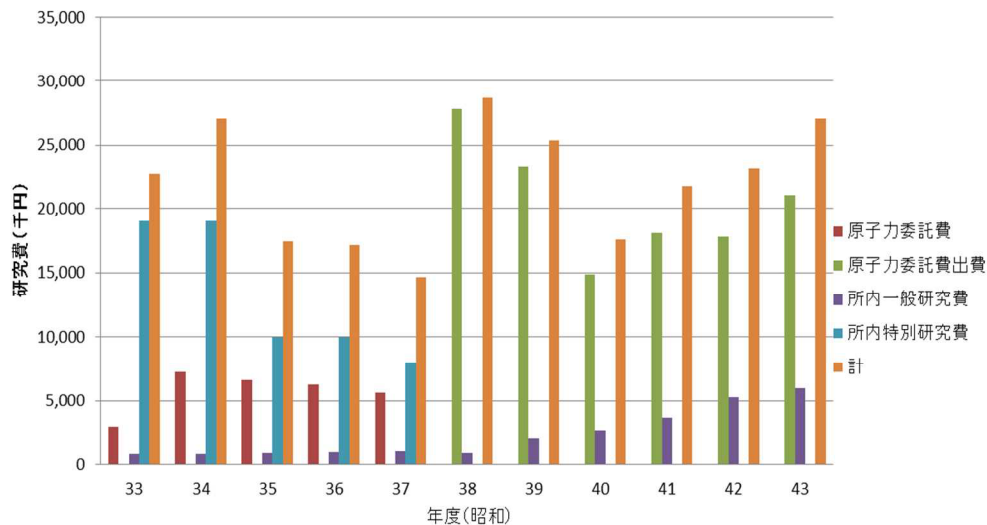


図1 理化学研究所核融合研究室・研究費.

- 114) 理化学研究所核融合研究室『理研における核融合研究の報告書 核融合研究委員会資料』, 1967年, 1-2頁.
- 115) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所報告』第39巻第1号別冊(1963年), 59頁.
- 116) 松田享子, 木原太郎「軸対称波状静磁場によるプラズマとじ込めの不安定性」, 『理化学研究所報告』第37巻第2号(1961年), 79-82頁. / 木原太郎「波状の軸対称静磁場でconfineされた荷電粒子運動の安定性に関する一定理」, 『核融合研究』第3巻第6号(1959年), 610-612頁.
- 117) M.N.Rosenbluth, C.L.Longmire, "Stability of Plasmas Confined by Magnetic Fields," *Ann. Phys.* Vol.1, No.2 (1957): 120-140.
- 118) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 1963』(『理化学研究所報告』第40巻第1号別冊)(1963年), 9頁.
- 119) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 1964』(『理化学研究所報告』第41巻1号別冊)(1964年), 11-12頁.
- 120) 理化学研究所核融合研究室『理研における核融合研究の報告書 核融合研究委員会資料』, 1967年, 8-9頁.
- 121) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 1965』(『理化学研究所報告』第42巻第1号別冊)(1966年), 11-13頁.
- 122) 塩原信司「マイクロ波自由空間法によりプラズマの電子密度を測定する場合の測定確度について」, 『核融合研究』第14巻第4号(1965年), 433-458頁.
- 123) 三好昭一 他「炭酸ガスレーザー干渉計によるプラズマ電子密度の測定」, 『核融合研究』第21巻第2号(1968年), 73-85頁.
- 124) 前掲120), 9-11頁.

- 125) S.Miyoshi, S.Shiobara and Y. Sakamoto, "Probe Measurement of Electron Density in Magnetoplasma," *Diagnostic methods and applications: Proceedings of the seventh International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Beograd, 22-27 August 1965 / edited by B. Perović and D. Tošić*, Vol.III (Gradevinska Knjiga: Beograd, 1966): 35-38.
- 126) 理化学研究所『理化学研究所 六十年の記録』, 理化学研究所, 1980年, 118-120頁.
 /『理化学研究所研究年報 1967』(『理化学研究所報告』第44巻第1号別冊) (1968年),
 13-15頁. /『理化学研究所研究年報 昭和45年度』(『理化学研究所報告』第47巻別冊)
 (1971年), 13-14頁.
- 127) 『(理化学研究所)所報』第149号42-10-1, 理化学研究所, 1967年, 4頁.
- 128) 原子力委員会『核融合研究開発の推進について』, 1968(昭和43)年7月4日.
- 129) 吉川庄一「資料第2-2号 報告書(将来計画), 物理部核融合研究室」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID: 056-03-032).
- 130) NIFS 核融合アーカイブ室に所蔵された史料「理化学研究所 昭和44年度実行計画」(ID: 002-22-10)を見ると, 史料上部に(伏見康治による)手書きメモで,
 円城寺氏, 大電流アーク予算の打ち切り
 [原研タータピンチ^{原文ママ}がこの協力がことわられたのでイオン源を目標にした.]
 原研とばかりでなく, 電試とも協力したい.
 と書かれていた. 理研は当初から電試とも共同研究を推進したいという意向を持っていたことが分かる.
- 131) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 昭和45年度』(『理化学研究所報告』第47巻別冊) (1970年), 13-14頁.
- 132) 一宮虎雄, 土手敏彦, 高山一男「探極による電離層の観測」, 『日本物理学会誌』第17巻第6号 (1962年), 384-400頁. /一宮虎雄 他「探極による電離層観測の問題点」, 『理化学研究所報告』第40巻第2号 (1964年), 78-86頁.
- 133) 三好昭一, 塩原信司, 坂本雄一「探針による磁気プラズマの電子密度測定」, 『核融合研究』第14巻第5号 (1965年), 521-535頁.
- 134) 三好昭一, 丸山晃市, 岡本耕輔「高エネルギーアークの探針測定」, 『核融合研究』第19巻第6号 (1967年), 468-491頁.
- 135) 西田靖, 河辺隆也「15. 静電および高周波探針」, 伏見康治編『実験物理学講座 30 プラズマ・核融合』, 共立出版, 1979年, 189-204頁.
- 136) 森一夫「理研における核融合分光計測」, 『理化学研究所ニュース』第45号 (1977年), 1-3頁(<http://www.riken.jp/~media/riken/pr/publications/news/1977/rn197705.pdf>).
- 137) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 昭和53年度』, 1979年, 14-16頁.
- 138) 『理化学研究所研究年報 昭和56年度』, 1982年, 16-17頁(「研究室紹介 核融合研究室」)および168-173頁(原子力関係研究1. 核融合に関する研究).

- 139) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 昭和 57 年度』, 1983 年, 22-23 頁.
- 140) 「研究室紹介 核融合研究室」, 『理化学研究所研究年報 昭和 58 年度』, 1984 年, 22-26 頁および 45-49 頁.
- 141) 理化学研究所『理研の研究活動』, 1988 年, 45-49 頁.
- 142) 前掲 21), 1 頁 (第 1 部 概況).
- 143) そのため, 「核融合研究開発基本計画」およびその前提となった「原子力開発利用長期計画」に基づく閉じ込め研究は, 「日本に欠けていた B 計画的要素を補うものであり, A-B 計画論争の未解決分を取り戻すもの」と解釈されたという: 前掲 2), 97 頁.

第4章 日本における初期の核融合研究体制への 「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議」の影響

1. 本章の背景と目的

1950年代から一部の国々で本格的に始まった核融合研究は、当初秘密裏に行われており、研究内容を正確に把握するためには困難を要した。しかし、1955年8月に国際連合主催で行われた第1回原子力平和利用国際会議(The First United Nations Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, ジュネーブ会議)において、議長バーバ H.J.Bhabha が開会講演の中で「熱核融合の平和利用」という課題を指摘し、20年以内に制御された形で核融合エネルギーを解放する方策が見つけられるであろうと予言したことにより状況は一変する¹⁾。バーバの発言は、核融合炉が世界のエネルギー問題を解決する可能性を秘めていることを提示し、「核融合」という研究課題を世間に広く認知させるきっかけとなった。

その結果、1958年9月に開かれた第2回ジュネーブ会議では、各国が核融合研究に関するこれまでの成果を一斉に公開した。そこには、核融合研究の重要性と困難さが明らかとなり、「一国の中で秘密裏に研究を行うよりも、積極的に情報交換を行う必要がある」と考えられるようになったことが影響していたという。しかし、第2回ジュネーブ会議での各国の発表からは、核融合炉の実現に対して、プラズマの不安定性をはじめとする克服すべき多くの問題が明らかとなった。このような流れを受けて、1957年に発足したばかりの国際原子力機関(IAEA)は加盟各国の核融合研究の進展と情報交換を目的とした「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議(The International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research)」の開催を決定する。同会議は、1996年の第16回会議から核融合炉の材料や慣性核融合のターゲット製造技術などのセッションを追加することで、会議名称を「核融合エネルギー会議(Fusion Energy Conference)」に変更し、現在も2年に1度のペースで開催されている。

以上のような経緯により、核融合エネルギー会議(以下、IAEA 会議)は核融合研究分野における国際会議の中で歴史が古く、最も重要な会議として位置づけられている。このことは、長年にわたって核融合研究に従事してきた吉川庄一と狐崎晶雄が、同会議を「核融合分野の国際オリンピック」と称していることからもうかがい知れる²⁾。IAEA 会議への出席・発表には、現在でも国内での発表論文の審査と政府の推薦が必要とされ、会議開催当初から同会議は「国威発揚的な性格を持つ」と評されていた³⁾。また、IAEA は同会議の開催地の条件として、その国での核融合研究の実情と会議への寄与を挙げているため、IAEA 会議での研究発表や開催地の変遷などを追うことで、各年代における世界の核融合研究の趨勢を知ることが可能となる。

そうした事情から、日本の核融合研究開発史においても、IAEA 会議はひとつの指標として扱われていることが多い。特に1960年代に開催された第1回から第3回のIAEA 会議は、国内への影響が強かった国際会議として取り上げられている。例えば、植松英穂、竹田辰興、

西尾成子の論文には、第1回および第2回 IAEA 会議でのヨッフエ(Ioffe)磁場による極小磁場配位およびトラス型内部導体系装置(多極磁場)を用いた平均極小磁場配位に基づくプラズマ安定化の実証から、日本でも目的研究復活の胎動が起こり、「1960年代の中期に至ってからは再び将来計画検討の動きが盛んになり、研究管理体制、組織、研究計画の議論が多数行われた」とある⁴⁾。また、吉岡斉は「1960年代後半に、日本の核融合関係者が、大学系と官庁系とを問わず、急速にプラズマ閉込めへの関心を高めていった背景」には、第3回 IAEA 会議までに「多くの炉型においてプラズマ不安定性を克服する方途が見出され、閉込め時間の大幅な延長が達成された」ことに加えて、特に第3回 IAEA 会議でのソ連のトカマク(Tokamak)装置による抜群の好データと、その後に行われた英国カラム(Culham)研究所によるデータの検証によって、国際的な研究情勢が変化したことにあると述べている⁵⁾。このほか、山本賢三⁶⁾や宮本健郎⁷⁾も、上記した IAEA 会議での3件の発表(ヨッフエ磁場、内部導体系装置、トカマク)を、1960年代における日本の核融合研究開発史を論じる上でのひとつの指標として取り上げている。

このように、先行研究では1960年代の IAEA 会議で発表されたヨッフエ磁場や内部導体系装置、トカマクという「世界的に注目を浴びた研究成果」が、日本国内における閉じ込め研究を推進する好転要因のひとつになったと評価されている。しかし、これらは同年代に開催された IAEA 会議での結果に関して、複数回もしくは3回全てを総じて考察された評価であり、各回の IAEA 会議が国内の核融合研究に与えた影響の詳細については、上記の評価からは判断できない。

他方、第1回から第3回の IAEA 会議は日本の核融合研究開発史におけるいわゆる「核融合研究黎明期」に開催されている⁸⁾。この時期、日本の核融合研究を志す研究者グループは素粒子や原子核、宇宙物理、電気工学、放電、加速器など様々な分野の研究者を集めて形成されたばかりであった。そのため、国際会議への対応という観点から見ても、発足したばかりの核融合懇談会を中心とする核融合研究者のコミュニティが IAEA 会議から容易に情報を収集できたとは考えにくい。

たしかに、先の吉岡や植松らの指摘にもあるように、IAEA 会議が日本の核融合研究とその研究体制に大きな影響を与えたことは容易に想像できる。だが、これまでの調査・研究では、IAEA 会議への国内での対応については全くといえるほど触れられてきておらず、また同会議の影響も上述した先行研究における評価以上の詳細な検討が未だなされていない。1960年代に開催された IAEA 会議の国内への影響を厳密に評価するためには、第1回から第3回までの IAEA 会議に対する日本の取組みと会議後の国内への影響を、各回の IAEA 会議で個別に調査する必要があるといえる。

そこで本章では、核融合研究黎明期と称される1960年代における日本の IAEA 会議への取組みと同会議が国内の核融合研究体制にもたらした影響について、研究者個人による動向や当時の国内における研究状況も踏まえた上で論ずることを目的とする。

2. IAEA 会議への初めての対応に苦戦：第 1 回 IAEA 会議(1961 年)

本章冒頭でも述べたが、第 1 回 IAEA 会議に関して、先行研究で注目されているトピックスはソ連の研究者が発表したヨッフエ磁場のみで、日本からの発表については全く触れられていない。このことについて、山本の著書『核融合の 40 年』では、日本からの発表は 0 件とあるが⁹⁾、核融合分野における初の専門的な国際会議である第 1 回 IAEA 会議に国内から発表が提出されなかったとは考えにくい。他方、山本によれば、同会議には 9 名の日本人出席者がいたようで⁹⁾、研究体制に影響を与える情報が国内に伝達された可能性は十分にありえる。しかし、山本は第 1 回 IAEA 会議への日本人出席者が具体的に誰であったのかという点については一切触れておらず、このほかの先行研究も含めて、第 1 回 IAEA 会議の情報は未調査の部分が非常に多いといえる。本節では、第 1 回 IAEA 会議開催前後での日本国内の取組みを中心として、初めての IAEA 会議に誕生したばかりの日本の核融合研究者コミュニティがどのような対応を取ったのかを見ていく。

2.1 第 1 回 IAEA 会議前の国内での対処

第 1 回 IAEA 会議は 1961 年 9 月 4 日～9 日にオーストリアのザルツブルクで開催された¹⁰⁾。核融合研究に特化した初の国際会議である第 1 回 IAEA 会議の開催に際して、国内での対応は核融合特別委員会(融特委)が務めた。融特委は 1959 年 5 月 14 日に日本学術会議下の特別委員会のひとつとして発足し、日本における核融合研究体制の検討や名古屋大学プラズマ研究所(プラズマ研)¹¹⁾の設立(1961 年)などに大きく寄与した。

IAEA 会議の出席者に関する議題は、1961 年 1 月 12 日の第 17 回融特委の中で初めて取り上げられた¹²⁾。同会議は主催が IAEA であったために、国内の窓口が学術会議ではなく、文部省および外務省であった点が他の国際会議と異なっていた。しかし、それまでに国際会議への対応経験がなかった融特委は、英国・国際科学委員会主催の電離気体現象国際会議(International Conference on Phenomena in Ionized Gases)の第 5 回会議(開催地：ミュンヘン)も同時期に開かれることを踏まえて、IAEA 会議とあわせて「1～2 名の出席者を推薦する旨を母体の学術会議に申し入れる」ことを決定し、学術会議経由での対応を試みている。なお、この時の議事録には、核融合分野における「国際会議にはどのようなものがあるかを調べる」という一節も併記されており、同時期から国内で世界の核融合研究に関する現状把握を努める動きが本格的に始まったことがうかがえる。

第 1 回 IAEA 会議の開催に関する公式のインフォメーション¹³⁾は、1961 年 1 月 16 日付で各国に送付された。そのため、結果として融特委の IAEA 会議への対応は会議開催通知よりも早かったことになる。しかし、川上一郎(日本大学)は核融合懇談会発行の学術誌『核融合研究』(1961 年 2 月)の編集後記¹⁴⁾で、「国際原子力機関主催の Austria の Salzburg の国際学会の申込め切まで間がありません」と記しており、研究者の間では差し迫った国際会議に焦りを感じていたようである。出席者についての具体的な議論は、この直後に開催された第 18 回融特委(1961 年 2 月 25 日)¹⁵⁾から始まり、小島昌治(東京教育大学、現在の筑波大学)と木原

太郎(東京大学)を融特委推薦の出席者とすることが、さらに第 19 回融特委(1961 年 4 月 3 日)¹⁶⁾において自費出席者として関口忠(東大)を追加指名することが決まった。

他方、先のインフォメーションには IAEA 会議で発表する内容の abstract を提出する締め切りとして、1961 年 5 月 15 日が指定されていた¹³⁾。ところが、融特委の中で日本から提出する発表内容について、選考・討論をした記録は見られない。つまり、会議での発表内容や IAEA への abstract 提出等は研究者個人に一任されており、融特委として把握していなかったと推測される。この時、日本から提出された abstract は融特委から会議出席の推薦を得ていた小島、木原、関口に、伏見康治(名大プラズマ研)、長尾重夫(名大プラズマ研)、小沢保知(北海道大学)、山田太郎(電気試験所、現在の産業技術総合研究所)らを合わせた計 7 篇であった¹⁷⁾。そのため、1961 年 6 月 17 日の第 20 回融特委では abstract の提出結果を踏まえて、さらに融特委推薦の自費出席者として小沢、山田、和田重暢(東京芝浦電気株式会社)を選出している¹⁸⁾。また、最初に融特委の推薦を得ていた小島、木原に対して学術会議から旅費が支給され、加えて伏見と長尾は文部省 B 項海外留学枠を用いて IAEA 会議に出席する運びとなった¹⁸⁾。

2.2 第 1 回 IAEA 会議概要と日本からの提出論文

第 1 回 IAEA 会議の出席者は基本的に各政府から推薦された研究者のみであったが、会場が大きかったために飛び入り参加も出来たようで、結果として 29 ヶ国と 6 つの国際機関から約 500 名が出席した。最終的に IAEA へ提出された各国からの abstract は約 250 篇であったが、その中から会議のプログラム編集委員会によって口頭発表が選出され、会議では 110 件の報告が行われた。このほか、本会議の Session 終了後には各国の要望によって、14 部門に分けられた非公式討論会が開催されている。なお、IAEA 会議は「各国の核融合研究の推進と国際交流を促進する」ことを目的としているため、当然ながら会議での発表内容は「高温プラズマ、特に制御核融合研究」に限定されていた¹³⁾。

各国別に見てみると、米国が 32 件、ソ連が 30 件と発表件数が多く、両国が研究をリードしていたことが分かる。その中でも第 1 回 IAEA 会議の epoch-making として挙げられるのが、先述したソ連クルチャトフ(Kurchatov)研究所のヨッフエ M. S. Ioffe らの発表である。あらためて同発表について概要を記すと、ヨッフエらの発表は post deadline paper として急遽口頭発表に組み込まれたもので、ミラー型装置に Ioffe-bar と称される winding を付加した「ミラー磁場とカスプ磁場の複合磁場配位」によって、閉じ込められたプラズマが MHD(磁気流体力学)的に安定化することを検証し、極小磁場原理(min.B)の重要性を実験的に提示したものであった¹⁹⁾。なお、ヨッフエの発表はプラズマ中の振動および波動現象に焦点が置かれた Session IX の中で報告されており、第 1 回 IAEA 会議においてヨッフエ磁場は「不安定性の制御・安定化」という観点で取り扱われていたことになる¹⁰⁾。

一方、総括講演を行ったアルティモービッチ L. A. Artsimovich の「我々は煉獄の中にいる」という発言も同会議のハイライトとして有名である²⁰⁾。講演冒頭でアルティモービッチは、

長年の成果によって核融合研究は進展したが、核融合炉の実用化という面からすれば、ようやくスタートラインに達したに過ぎないと発言した。その後、会議で報告された各実験装置による結果をひとつずつ取り上げて、特に交換型不安定性が生じるミラー型装置と「高温プラズマの閉じ込めを長時間保持することが出来ない」と理論的に示されたカスプ型装置に対して、明らかに批判的な見解を述べている。そして、当初容易であるとされた核融合炉実現の根拠はなくなり、その希望は「罪深き人々の煉獄を避けて天国へいけると考えることに似ている」と表現した。上記発言は「煉獄(Purgatory)」ということばの印象が強かったためか、当時の実情を上手く表現した発言として、しばしば取り上げられている。ただし、彼の講演はこれで終わっておらず、「この煉獄から理想的な真空技術、磁場配位の完成等により、実験事実との関係によって依然として汚れていない理論物理学の概念のように、きれいで静かな安定した超高温プラズマを手に入れて、脱出するだろう」という今後への期待を述べて、講演を締め括っている。

ここで、日本から提出された発表に注目してみる。先に述べたように、第1回 IAEA 会議において日本からは7件の発表が申請され、その中で山田ら電試グループの“The theta pinch device of the electrotechnical laboratory in Japan”が本会議での口頭発表に選出された。このことは、会議直前に公表された provisional program から確認できる²¹⁾。『電気試験所彙報』に掲載された電試グループの第1回 IAEA 会議への提出論文²²⁾によると、同研究の主目的は小型テータピンチ装置におけるプラズマ測定で、内容は次の5点に要約される；

- (1) ロゴスキーコイル(Rogowsky coil)によりプラズマの θ 方向電流成分を測定し、コイル電流との位相の違いを発見した。
- (2) 流しカメラにより軸方向、半径方向のプラズマの運動を観測し、その解析を行った。
- (3) 径方向の磁場を横切って拡散するプラズマの拡散速度を求めた。また軸方向に著しく速いプラズマの損失があることを認めて、損失とミラー比、 β の関係を求めた。
- (4) 8mm マイクロ波により電子密度は 10^{14} 個/cm³を越え、コイル電流が0になった後も10 μ sec程度のあいだ、電子密度は遮断密度以上であることを確認した。
- (5) 放電管内に重水素ガスを充填した場合には、1回の放電につき 3×10^4 個の中性子を得たが、これが核融合反応によるものか否かは決定できなかった。

上記5点の中で注目すべき点は、実験によって観測された中性子が「核融合反応によるものか否かは決定できなかった」という記述である。これに対して、論文よりも先に提出された abstract では「中性子が観測された」ことのみが記され、その発生源が特定出来ていないとは書かれていなかった¹⁷⁾。当時、「核融合反応によって中性子がどの程度発生するか」ということは議論的であり、中性子が観測された時点でそれが核融合反応によって生じたものか否かは重要なファクターであった。その点を踏まえて、第1回 IAEA 会議のプログラム編集委員会は山田らの発表の中性子発生源を重要と捉え、口頭発表に選出したと思われる。なお、後年に提出された報告書においても、電試グループは観測された中性子の発生源を特定するには至らなかったとある²³⁾。しかし、電試グループの発表が口頭発表に選出さ

れたことには変わりなく、同発表は日本初の IAEA 会議における口頭発表として位置づけられるはずであった。

ところが、山田らの発表は会議の Session には組み込まれておらず、他の日本人の発表と同様に“abstract only not presented”として取り扱われている¹⁷⁾。この大きな理由は「山田太郎の会議欠席」にあった。最終的に日本からの第 1 回 IAEA 会議出席者は、融特委の議論で名前が挙がった小島、木原、関口、小沢、和田、伏見に加えて、石井博(電試)、岩竹松之助(芝浦工業大学)、矢崎為一(山梨大学)の計 9 名で、融特委で出席者として名前の挙がっていた山田や長尾は会議に出席していなかった²⁴⁾。これまでの調査で山田の欠席理由を記した史料は見つかっていないが²⁵⁾、当時の時代背景を考慮すると、山田が会議に欠席した理由として先ず考えられるのは、「海外への出張旅費が確保できなかった」ということである²⁶⁾。上述したように、第 1 回 IAEA 会議への出席者の中でも旅費が支給されたのは小島と木原の 2 名だけで、残りの研究者は自費出席者扱いとなっていた。つまり、自費出席者として位置づけられていた山田は、たとえ口頭発表に選出されたとしても何らかの方法で旅費を確保しなければならず、それが出来なかったことが会議欠席の最大の原因であると考えられる。

2.3 第 1 回 IAEA 会議がもたらした国際会議への対応に関する課題

第 1 回 IAEA 会議後、日本物理学会や融特委、プラズマ研の運営委員会(運営委)の場で同会議に関する報告会が開催されている。物理学会では、第 16 回年会の中で核融合シンポジウム「ザルツブルグ国際会議報告」が開催され、木原、小島、関口によって同会議の内容が報告された²⁷⁾。また、1962 年 7 月の第 22 回融特委では木原と伏見によって会議報告が行われ、木原は IAEA 会議のような国威発揚の色彩の強い会議では、国内でのまとまった用意と十分な準備時間を取ることが必要であると発言し、伏見はソ連の研究に早く正確に触れるためにロシア語の習得が必要で、基礎研究を重視するプラズマ研の方針が世界の大勢と一致していることを報告した²⁸⁾。しかし、上述した Ioffe-bar の実験結果は報告会で一切触れられず、融特委の委員長であった嵯峨根遼吉は、日本人出席者が同実験結果に注目していなかったことに対して、のちに「なぜそのような重要なエポックを見逃さずに、日本国内にいち早く紹介できなかったのか？君たちはどこかタガがゆがんでいる」と発言し、一喝したという²⁹⁾。

このように、第 1 回 IAEA 会議への対応に関してみれば、日本は他の国際会議と性格が異なる IAEA 会議に対して、十分な対応を取ることが出来なかった。また、山田の会議欠席によって日本からの口頭発表は 0 件となり、初の IAEA 会議への参加は大きな課題を残すことになった。さらに日本人出席者も会議の性格を理解しておらず、重要とされる研究成果も国内へ伝達することも出来なかったため、第 2 回 IAEA 会議へ向けての課題があらわになった。これは換言すると、国際会議への事前の取組みが確立していない第 1 回 IAEA 会議の段階では、研究体制に大きな影響を及ぼすような情報が国内に伝達されることはなかったと

いえる。

3. 世界的な研究方針の転換を実感：第2回 IAEA 会議(1965年)

第1回 IAEA 会議から4年後の1965年、英国のカラム研究所にて第2回 IAEA 会議が開催された。植松らも指摘しているが、この第2回 IAEA 会議の段階は「プラズマ不安定性についての理解が進んだことで、核融合研究に徐々に見通しが開け始めた時期」であったとされ、さらに国内でも第2回 IAEA 会議をきっかけのひとつとして、将来計画に関する議論が行われるようになったという³⁰⁾。このほか、山本も第2回 IAEA 会議によって「世界の研究は新しい発展段階を迎えつつあることが明らかになった」と述べている³¹⁾。しかし、詳細は後述するが、国内での核融合研究の方針が「プラズマ物理学中心の基礎研究」から「核融合炉を意識した閉じ込め研究」へと転換されるのは1960年代末であり、第2回 IAEA 会議直後の1965年頃には未だ国内の研究体制が大きく変わることはなかった。本節では、第1回 IAEA 会議の反省を踏まえて行われた第2回 IAEA 会議への出席者決定の動向に加えて、会議後の国内での研究体制に関する議論にも焦点をあて、第2回 IAEA 会議そのものが、日本の核融合研究体制にどの程度の影響を与えたのかを概観する。

3.1 第2回 IAEA 会議に対する国内の対応

第1回 IAEA 会議の報告において出席者が口を揃えて述べたことは、IAEA 会議に対する国内での早期準備の必要性であった。そのため、日本の第2回 IAEA 会議への対応は迅速で、会議開催の前(1964)年から、融特委の中に新たに設けられた国際交流小委員会を中心に議論が行われている。同小委は1964年8月の第30回融特委³²⁾で、国際会議・研究会への派遣メンバーの人選、日本に訪れる外国人研究者の一貫した措置、国際会議などの誘致などを考える「公的な機関」という位置づけのもとに、融特委の下部組織として将来計画小委員会などと一緒に新設されたものであった。

融特委では早速、第2回 IAEA 会議に関して、木原を委員長とする国際交流小委で出席者ならびに IAEA に提出する論文の選考を行うことが取り決められた³²⁾。そして、1964年12月開催の第31回融特委で、IAEA 会議については前回の反省を踏まえて、会議に出席する公式な代表者を5名程度選出することや学術会議とプラズマ研奨励会等から旅費を支給して貰えるように働きかけることが決議された³³⁾。また、出席者についても IAEA からのインフォメーションによって会場の定員が275名であることが判明し、前回は許された私的な会議出席は不可能であると判断されたため、伏見、関口、木原、森茂(日本原子力研究所)、寺嶋由之介(名大プラズマ研)の5名からなる第2回 IAEA 会議国内論文選考委員会を組織し、発表および出席者に関する選考が行われることになった。

第1回目の国内選考委は1965年1月21日、木原、伏見、関口、森が集まって開催された。そこでは、国内での論文選考について大綱が話し合われ、発表論文に関しては自主的応募の呼びかけを行うことが決定する³⁴⁾。その後、科学技術庁原子力局からの選考委員選出

依頼(1965年2月16日)に基づき、提出論文選考メンバーとして伏見、木原、関口、森、吉村久光(日大)の5名が選出され、発表論文の国内選考体制が整えられた。そして、3月8日に開催された第2回IAEA会議提出論文報告会では、発表者による英語での講演9件が行われた³⁴⁾。これを踏まえて、発表の適格性が翌3月9日の発表論文選考委員会(委員長：伏見)で討論された結果、提出論文は全て質が非常に良く、同会議に日本より提出する論文として適当であるとの判断が下され、IAEAへの提出が認められた³⁴⁾。なお、日本からの提出論文タイトルは以下の通りである³⁴⁾：

“Plasma Confinement with High Frequency Multi-pole Field”

Hiromichi Kondo, Katsushi Toshioka, Toshio Tobita

“Dense Plasmas Produced by a-Cusp Injection”

Hiroshi Ito, Tsutomu Ishimura, Keiichi Hirano, Atsuhiko Ozaki, and Kunizo Shinano

“Ion Cyclotron Response Heating and Adiabatic Compression of the QP Plasma”

K. Matsuura, A. Miyahara, T. Sato, T. Kuroda,
M. Masuzaki, S. Fujiwaka, C. Kojima and S. Nagao

“Overstability of Transverse Waves near the Electron Cyclotron Harmonics in a Uniform Plasma with Anisotropic Velocity Distribution”

Y. Terashima

“Plasma Relaxation Rates,--- A Collection of “Exact” Formulas”

Taro Kihara and Osamu Aono

“Stability of Slow Theta Pinch Plasmas Driven by Field with Improved Symmetry”

T. Miyamoto, H. Ohnishi, S. Hamada

“Dynamics Behavior and Heating Mechanism in the Slow Theta Pinch Plasma”

S. Shiina, H. Ohnishi, K. Yokoyama, H. Yoshimura,
S. Hamada, M. Yokota, Y. Takeda and K. Sato

“Stabilization of Helical Instability by Controlling Radial Distribution of Plasma Density”

K. Adati, Y. Iida, T. Sekiguchi and N. Yamada

“Experiments on Collision-Dominant and Collision-Free Plasma Flows Past Bodies in a Magnetic Field”

N. Kawashima and S. Mori

その一方で、選考委では出席者に関しても議論が行われ、IAEAからの枠9名に対して、伏見、長尾、寺嶋、木原、森、近藤博通(三菱電機株式会社)、伊藤博(大阪大学)、濱田繁雄(日大)、大西晴幸(日大)、河島信樹(原研)、岡本耕輔(理化学研究所)、百々太郎(株式会社日立製作所)の12名を出席予定者として決定した³⁴⁾。なお、出席者の中で長尾、寺嶋、木原、関口には用意された旅費が支給され、残りのメンバーは旅費を各自で調達する条件付き出席者の形が取られている。ただし、条件付き出席者の論文が口頭発表に採択された場合は旅費調達の面で特別に配慮し、出席者枠がなければ拡張できるように努力することが確認され

た。さらに、条件付き出席者への注意として、論文提出者が会議に出席できない場合には代読者を決めて、会議への対応を取ることが求められた。

以上の経過と選考委での結論は、1965年4月に行われた第32回融特委の中で報告された³⁵⁾。しかし、融特委では出席者の選考過程に問題があったのではないかとして議論が巻き起こった。なぜならば、論文選考委員5人のうち4人(木原、関口、森、吉村)が論文提出者もしくは共著者となっており、結果として「自分で提出した論文を自分で選考した」という形になっていたからである。会場にいた寺嶋が『核融合研究』編集後記の中でこの時の模様を「選考過程にいろいろと曲折がありましたがここでは触れません、後日の正式報告をご覧ください」と述べている点から見ても、今回の論文選考に問題があったことは明らかであった³⁶⁾。しかし、会議開催まで押し迫っていることもあって、今回はこの審査結果を了承することになり、今後同じような問題が生じないように十分に注意することを融特委として決議することで、事態の収束がはかられた。なお、これと同時に、第32回融特委では伏見を日本代表団の団長として選出している³⁶⁾。

そして、1965年6月9日の第33回融特委において、IAEAへ提出した日本からの発表の中で、長尾と伊藤の発表が口頭発表に選出されたこと、ならびに日本からの出席者に関しては、上記12名に宮原昭(名大プラズマ研)を加えて、IAEAに申請されたことが木原から報告された³⁷⁾。前回会議で山田らの発表がキャンセルされたために、今回選出された長尾と伊藤の発表がIAEA会議における日本からの初の口頭発表となった。ところがこの直後、当初日本代表団の団長として決まっていた伏見の旅費調達が上手くいかず、会議への出席が難しくなってしまった。そこで口頭発表に選出された長尾を団長とすることが、7月13日の核融合懇談会総会で承認された³⁸⁾。最終的に会議に出席する日本代表団は、長尾、伊藤、宮原、森、関口、寺嶋、岡本、横田昌広(日大)、宇尾光治(京都大学、当時カラム研究所に留学中)の9名で構成され、出席に際して第2回IAEA会議と各国研究機関の情勢調査が求められた³⁹⁾。なお、在米日本人研究者であった大河千弘(ジェネラル・アトミック、General Atomic: GA社)と吉川庄一(プリンストン大学プラズマ物理研究所: PPPL)も、米国代表団の一員として第2回IAEA会議に出席した。

3.2 第2回IAEA会議概要と日本からの提出論文

万全の体制を整えた日本代表団は、満を持して第2回IAEA会議に出席した。第2回IAEA会議は、1965年9月6日から10日までの5日間にわたってカラム研究所 Lecture Theaterで行われ、26ヶ国と3つの国際機関から268名が参加した⁴⁰⁾。前回同様、会議後にはクライストチャーチ大学(Christ Church College)にて非公式討論会も開催され、会期中にはカラム研究所の見学会も行われた。

各国の会議発表数を見てみると、米国とソ連は34件と同数であるが、米国はミラー関係に、ソ連がトカマクに関する報告に重点が置かれていた。他方、ソ連からはテータピンチに関する発表が1件もなく、この形式に関心を持っていなかったことがうかがえる。日本か

ら口頭発表に選出された伊藤のカサブ磁場へのプラズマ入射に関する発表は Session VII の最初に、長尾の QP 装置における加熱実験の発表は最終日 Session IX の 6 番目にそれぞれ組み込まれた。

同会議における発表の全体的な傾向は、ヨッフエ磁場についての各国による理論研究と追試実験、トーラス装置に関する発表の充実、ソ連によるトカマク計画の全貌公開などで、第 1 回 IAEA 会議後 4 年間の様々な研究成果が報告されている。その中でも、トーラス装置での平均極小磁場の安定化効果を提示した、大河ら GA グループによる内部導体系オクトポール(Octopole)装置の実験⁴¹⁾は、同会議における実験関連の発表の総括講演を行った PPPL のスピッツァー L. Spitzer によって「核融合研究における milestone」として讃えられた⁴²⁾。

日本から口頭発表に採択された 2 件の発表について見てみると、長尾ら名大プラズマ研の発表⁴³⁾は、完全電離プラズマ(QP : Quiescent Plasma)装置 P-4 による低密度プラズマのイオンサイクロトロン加熱と断熱圧縮に関する実験で、安定した高イオン化プラズマ流をイオンサイクロトロン周波数 ω_{ci} 付近の周波数でらせん型対電極もしくはスティックス(Stix)型の誘導コイルを用いて加熱することで、約 10^{10}cm^{-3} 以下の密度において、数百 eV 以上のイオンの加速に成功している。なお、abstract には「共振による異常損失は検出できなかった」とあるが³⁴⁾、その後提出された発表論文では、「プラズマの異常損失を観測した」と記述が改められていた⁴³⁾。これに対して、伊藤ら阪大グループの発表⁴⁴⁾は双円錐形のカサブ磁場中に水素と重水素で構成された高密度プラズマを注入する実験で、磁場に捕捉されたプラズマが安定であることを確認している。発表論文には、プラズマ密度 10^{15}cc^{-1} 以上で重水素プラズマのエネルギースペクトルを観測し、平均エネルギーが約 2keV であることを明らかにしたが、イオン温度と電子温度の時間依存性は確認できなかったとある。

なお、両発表はどちらかといえば“nuclear fusion”というよりも“plasma physics”に重点が置かれていた。この点について、長尾は会議後、日本からの発表内容は“plasma physics”に偏っていたために、結果として口頭発表数を少なくした要因になったと分析している。そして、IAEA 会議は“plasma physics”と言っても、「核融合研究に直接関連ある論文に限定されており、会議名称の“and”にはその意味が含まれていた」として、会議名称を正直に捉えすぎたことへの反省の弁を述べている⁴⁵⁾。

3.3 第 2 回 IAEA 会議の日本への影響

第 2 回 IAEA 会議へ組織立って出席した日本人研究者たちは、それぞれが担当する Session について詳細な記録をとり、また諸外国の研究機関の視察も行いながら帰路についた。帰国後、国内では前回会議の時よりも大規模に報告会が企画され、例えば日本物理学会第 20 回年会⁴⁶⁾や第 34 回融特委⁴⁷⁾などで報告講演が開かれている。さらに核融合懇談会・常任委員会主催による「カラム会議報告会」がプラズマ研で催され、出席者が郵送・持参した約 10kg にもなる論文の分析も行われた⁴⁸⁾。

さらに、第1回会議での反省として、伏見がソ連の発表内容を早く認識する必要があると述べていたことに関しても、対応が取られた。具体的にいえば、1965年10月13日の常任委員会⁴⁹⁾および翌日10月14日の核融合懇談会総会⁵⁰⁾にて、第2回IAEA会議に提出されたロシア語論文の翻訳作業について議論が行われ、その結果、ソ連の論文はプラズマ研内の文献センターに登録される運びとなり、あわせて吉村他の有志によって翻訳作業が行われることになった。

報告会の結果、世界の核融合研究は第1回IAEA会議の時点から大きく転換していることが明らかとなり、日本における今後の研究方針について検討が必要であることを、研究者たちは認識させられたといえる。そして、早急な方針転換の必要性を実感し、具体的な将来計画を提案する者が現れ始めた。例えば、会議に出席していた関口はカラム研究所や西独のマックス・プランク(Max-Planck)研究所を見学した結果を踏まえて、原研、電試、理研の統合による「新研構想」を考案した⁵¹⁾。すなわち、帰国後に自身が委員長を務める融特委の第2次将来計画小委員会において、関口は「将来の核融合炉としての実現の可能性を絶えず意識しつつ、理学的内容に止まらず、その実現に不可欠な装置技術上の問題点を絶えず指摘しては逐次それを克服するための新しい工学技術を開発し、その際含まれるのが常である“装置設計上の誤り、失敗”までも含めて、“積み重ね的”に着実に成果を得てゆく、いわば核融合総合研究装置的アプローチ」を実現することが、今後の国内での研究には欠かすことが出来ないことを提示したのである。

同案の背景には、西欧諸国の研究所との予算や研究規模の差、さらには第2回IAEA会議での各国の成果を考慮し、世界の核融合研究に追いつき追い越すための組織づくりを行わなければ、確かな成果は達しえないであろうという見解があった。そして、「核融合総合研究装置的なアプローチ」が日本に必要という関口の判断は、世界の動向が大型装置を用いた閉じ込め研究に向いていることに裏付けられたものでもあったわけである。ところが、この関口の「新研構想」は、研究者たちがそう簡単に受け入れられるものではなかった。将来計画小委による提案の周知と研究者の意見聴取のために開催された2回の地区別討論会では、構想がプラズマ研を中心とする現行体制への批判とも受け取れる点や「新研=3研の拡張」とも捉えられる説明について、多くの研究者が疑問を呈した⁵²⁾。

その後、第2次将来計画小委が取りまとめた『プラズマ核融合将来計画(第2次案)』⁵³⁾(1966年10月)を踏まえて、原子力委員会は駒形作次を主査とする長期計画専門部会核融合分科会を組織し、検討作業に入った。その際、関口が提案した「総合装置的アプローチ」は「総合装置的プロジェクト」として、その推進を昭和44(1969)年度より積極的に行うことが決定する。そして、プラズマ物理学の充実を図ると同時に、「核融合を明確な目的とする総合的な研究開発を順次計画的に推進すべき」であるという方針が1967年4月13日改定の『原子力開発利用長期計画』⁵⁴⁾に反映されることになった。しかし、研究者の中で反対意見が多かった「新研構想」は同長期計画には反映されず、「総合装置的プロジェクトは大学、民間企業の協力のもとに、関係各機関において分担して行なう」⁵⁵⁾とされた。そして、『原子力開

発利用長期計画』に示された研究を進めるに際して、第2次核融合専門部会(部会長：菊池正士)での審議⁵⁶⁾を経て、原子力委は「核融合研究開発の推進について」および「核融合研究開発基本計画」を1967年7月4日に発表した⁵⁷⁾。これにより、原研や電子技術総合研究所(電総研、旧電試)、理研といった科技厅や通商産業省傘下の研究機関は、1969年度からの7ヵ年計画として、原研が「トーラス磁界装置の研究開発」、電総研が「テータ・ピンチ装置による高ベータ・プラズマの研究」、理研が「トーラス磁界装置の研究開発の関連技術開発」に従事していくこととなる。なお、原研ではすぐさま第2回IAEA会議での大河らの研究を参考に、同基本計画における「対称性低ベータ・トーラスに関する予備実験」として、内部導体系ヘキサポール(Hexapole)装置 JFT-1 を立案し、具体的な設計・建設を開始した⁵⁸⁾。

他方、名大プラズマ研でも第2回IAEA会議によって各国の研究状況が判明したことで、これまでの計画の見直しも含めて、今後の方針に関する議論が行われた。それまでのプラズマ研は1961年の設立以降、プラズマの基礎的・体系的研究という観点でQPやTP(Test Plasma)という二つの計画が、さらに1962年度からは高温発生部門に関するFP(Future Plan)としてBSGプロジェクトなどが遂行されていた。しかし第2回IAEA会議をきっかけとして、閉じ込め実験をプラズマ研にも導入すべきとの意見が所内で必然的に生じたという⁵⁹⁾。

その中でも、早期に第2回IAEA会議の影響を研究計画に反映させようとしたのは、会議で発表を行った長尾であった。会議直後の第23回運営委⁶⁰⁾の中で、長尾はQP計画に関する今後の方針に触れて、現状として日本の研究水準は「約4~5年の遅れがある」と報告した。また、次のIAEA会議までにこの遅れを1~2年に縮めた上で現在の計画を終結し、「1975年頃には世界的水準に達するものとしなければならない」と述べている。長尾は関口と同様に、カラム研究所への視察や第2回IAEA会議の結果を踏まえてプラズマ研の遅れを認識し、上記のような発言ならびに将来計画の立案をしたと考えられる。しかし、厳密に見れば、長尾は関口とは観点の異なる主張をしている。関口が「総合研究装置」を用いた核融合炉を目指す研究を行うべきであるとして、研究方針の早急な転換を求めたのに対して、長尾は現状の研究を推進していくことで、世界的レベルに到達させるという考えを持っていた。

この後、プラズマ研では1966年から「熟成期」と称される「装置改造5ヶ年計画」が遂行され、「既存の装置によるプロジェクトの完成」や「技術研究部門の出立」、「周辺大学研究室への援助」が行われたと同時に、共通電源や低ベータ・トーラス、高ベータ実験、レーザー研究などの多岐にわたる新計画および基礎実験や理論分門に関する将来構想が相次いで検討され始めた⁶¹⁾。その結果、第2回IAEA会議での成果も踏まえた「附加磁界4極計画」や「平均極小磁界」などに関する特別委員会が、所内に発足することになる。

しかし、その一方で将来構想の議論の中には、「新研構想」のような現状からの急激な変革もいくつか提案されており、これに対する反発がプラズマ研の内部にも存在していた。例えば、運営委で議論された「大河千弘を理論部門教授としてプラズマ研に招聘する提案」が挙げられる。同案は、海外渡航を通して大河の活躍を見てきた所長の伏見によって発案された。この件が議論された第28回運営委(1966年12月)では、大河を理論部門の教授として呼

ぶことは研究所のプラスとなるという意見を林忠四郎(京大)が述べる一方で、大河の GA での研究成果は米国の潤沢な研究資金に基づくものであり、日本の研究環境で同じ成果を出せるかは疑問であるという意見が多数出されたほか、吉村久光は「われわれのこれまでの努力を無視して、あるいは、それでは不十分として、このような drastic な人事を主張されるのは耐え難い」とまで発言した⁶²⁾。結局、理論部門の人事は公募によって募集することになり、暗に閉じ込め研究をプラズマ研でも行うために大河を招聘しようという伏見の提案は、運営委で受け入れられることはなかった。

このように、第2回 IAEA 会議の出席者によって、国内に正確かつ迅速に同会議の成果が報告されたことで、日本人研究者は世界との核融合研究の規模の差を実感することになった。そして、そこから生じた国内における体制や今後の研究方針に関する議論は、結果として日本の核融合研究を世界的水準まで高める起爆剤の役割を果たした。しかし、現行体制の急激な転換へのアレルギーが研究者のなかには生じており、基礎研究から閉じ込め研究への完全な方針転換には、未だ時間を有する必要があった。

4. 「内部導体系装置への悲観」と「トカマク旋風」の日本への影響

: 第3回 IAEA 会議(1968年)

1968年8月1日からソ連のノボシビルスク(Novosibirsk)にて、第3回 IAEA 会議が開かれた⁶³⁾。同会議でのアルティモービッチらによる発表が、のちに世界各国でトカマク装置の急設が進む契機となる。そのため、吉岡は同会議を「世界的な核融合ブームを再燃させる大きな転機となった」と評している⁶⁴⁾。そして日本国内においても、第3回 IAEA 会議とその後に行われたカラム研究所グループの追試実験に基づき、原研でトカマク装置 JFT-2 の建設・実験が行われることになった。しかし、これは第3回 IAEA 会議での発表とその後の国内での議論の経過のみを取り上げて史実を評価した結果であり、誤りではないにしても、分析としては未だ十分とはいえない。ここでは、第3回 IAEA 会議が日本の研究体制に与えた影響について、先行研究で取り扱われたトカマク装置以外の点にも注目し、同会議への日本の取組みと併せて詳述する。

4.1 第3回 IAEA 会議への日本の取組み

第3回 IAEA 会議の時期と開催地についての情報は、当時海外出張していた川崎温(名大プラズマ研)が内田岱二郎(名大プラズマ研)に宛てた書簡を通して、比較的早く国内に知らされていた。『核融合研究』に掲載された1967年10月12日付の川崎書簡には、

明年(1968年)ソビエトで開かれるのは、正に IAEA 主催のものに間違いのないことです。・・・こんどは、Culham から3年しかたっていない点を聞きましたが、何も equal space で開かれるとは決まっていないではないかとの返事、・・・但し、この話はまだ unofficial であるとの事です。正式決定にはなっていないとのことでしょう。Novosibirsk での話も、まだ決定されてないらしいです。・・・

とあり、この段階で第3回 IAEA 会議がソ連で開催されることは内定していた⁶⁵⁾。

日本国内における第3回 IAEA 会議の出席者ならびに発表論文に関する議論は、1968年1月18日開催のプラズマ研第34回運営委において、融特委の後継組織である原子力特別委員会(力特委)核融合部会・国際交流小委員会の委員長であった山本賢三の報告に端を発する。この時、山本からは同年8月にノボシビルスクで第3回 IAEA 会議が開催されるが、国際交流小委としては出席者を「前回のよう人員を絞ることを目的としてはコントロールしない」との報告がなされた⁶⁶⁾。これは、上述した第2回 IAEA 会議での国内選考における問題を考慮した結果ではないかと推察される。なお、この段階で10件の発表が申請されていたことも報告されているが、発表募集に関する連絡はこれ以前の力特委議事録には見られず、別途に第3回 IAEA 会議の発表募集についての通達が出されたものと考えられる。

他方、研究者のあいだでは今回の機会にソ連の核融合研究機関を視察する計画が持ち上がった。そのため、内田と水野幸雄(名大プラズマ研)を幹事として研究機関への団体見学に関する打合せがプラズマ研で開催された⁶⁷⁾。同打合せの議事録によると、この時(1968年2月26日)、既に第3回 IAEA 会議には約18名の研究者が出席することが見込まれていた⁶⁷⁾。そこで、訪ソ経験者である伏見や山本、岡本、石塚浩(東大)の意見を参考に、会議出席者が訪問する研究所と費用、見学スケジュール案などが検討され、クルチャトフ研究所など訪問する7カ所を選定し、加えて訪ソ経験者である伏見を団長とすることが決定された。

その後、1968年3月2日に開かれた力特委核融合部会(第7期第6回)では、最終的に国内から11件の発表が提出されたことや、出席者数に制限がなかったために国内で予め選考を行わなかったこと、さらに学術会議への佐藤正知(日大)の旅費申請を部会として推薦することが山本から報告された⁶⁸⁾。また、第2回 IAEA 会議と同様に会議内容の消化方法について検討が行われ、団長となる伏見に方法が一任されることとなった。しかし、申請された文部省からの旅費支給が難しく、またしても伏見のソ連への渡航は困難になってしまう⁶⁹⁾。その結果、団長は山中千代衛(阪大)が務めることになり、山中に加えて佐藤、高山、宇尾、内田、宮原、大西、岡本、長尾(東北大学)、今津信吾(新潟大学)、板谷良平(京大)、中井貞雄(阪大)、奥田孝美(名大)、阪上幸男(奈良工業高等専修学校)、梅野正義(名大)、田中正俊(原研)の計16名が第3回 IAEA 会議に出席した。

4.2 第3回 IAEA 会議の概要と日本からの発表

1968年8月1日から7日間の日程で開催された第3回 IAEA 会議は、24ヶ国から約400名の研究者が参加し、123件の発表が行われた⁶³⁾。しかし、発表の大半はいくつかの研究成果を統合したものを代表者が報告するというラポータ形式が取られ、日本からの発表もラポータ形式として、6件がプログラム編集委員会によって口頭発表に採択された⁷⁰⁾。

各国の発表を見ると、ソ連はテータピンチや内部導体系装置に関する発表が一切なく、トカマクと加熱研究に集中しているのに対して、アメリカは内部導体系装置とテータピンチ、トラス閉じ込め理論の発表が中心で、米ソ間でますます研究方針の違いが浮き彫りにな

っていた。上述した通り、第3回IAEA会議におけるソ連のトカマク装置T-3がボーム(Bohm)拡散時間を大幅に超える閉じ込め時間を提示し、その後の「トカマク旋風」を巻き起こすきっかけをつくった⁷¹⁾。一方、第2回会議で milestone と評価された内部導体系装置では、米国 PPPL の吉川庄一によってスフェレータ(Spherator)での対流セルの観測結果⁷²⁾が示されたほか、大河や吉川允二らガルフ・ジェネラル・アトミック(Gulf General Atomic)のグループは連結距離と磁気井戸の深さが異なるオクトポールとクアドルポール(Quadrupole)での不安定性の比較・検証結果⁷³⁾を報告した。しかし、内部導体の支持棒について「技術開発にはかなりの時間を割かなければならない」とアルティモービッチが会議総括で結論したためか、悲観的な印象が持たれる結果となった⁷⁴⁾。他方、アルティモービッチは総括講演で「閉端系装置は実験計画の堅実さが欠けており、複雑な非対称配位を研究する前に、ゼータ(ZETA)やトカマク、レビトロン(Levitron)、環状ステラレータ(Stellarator)といった単純な形状での研究に集中すべきである」と述べる一方、開端系と閉端系のどちらが良いかという結論は出ていないとして、今後も様々な路線の平和的共存が不可欠であると評している⁷⁴⁾。

次に、日本からの発表について概要を述べる。名大プラズマ研からは TPM, QP, TPC の各装置による実験結果が口頭発表に選出された。1965年より基礎実験部門として開始された単純ミラー磁場を有する TPM 装置の相対論的プラズマ実験⁷⁵⁾では、高出力パルスマイクロ波によって電子プラズマをミラーコイル中に生成し、そこで生じた不安定性について論じている。この不安定性は、マイクロ波の強いバーストと熱電子の突然の消失によって特徴づけられ、電子サイクロトロン不安定性またはホイスラー不安定性であると判断された。一方、プラズマ研の主要装置であった QP 装置では、第2回IAEA会議で報告した圧縮コイルによるプラズマの断熱圧縮を、立ち上げの速いテータピンチに切り替えた実験を行い、ステックコイルによってイオンサイクロトロン波を励起し、一様な磁場における波の分散関係や磁気ビーチにおける波の振幅および波長の空間的構造を測定することで、サイクロトロン減衰の効果を確かしている⁷⁶⁾。このほか、1963年より始まった TPC 装置の実験では、セシウムプラズマ中での付加電場によるドリフト波の圧縮に関して、その結果が発表された⁷⁷⁾。

このほか、国内の大学からは日大や京大、阪大の研究成果が口頭発表に選ばれている。日大の発表はミラー・テータピンチによる熱い電子プラズマの生成や加速機構、閉じ込めについての実験結果で、同装置における閉じ込め時間はミラー比 1.5、密度 $10^{13}/\text{cm}^3$ のプラズマで約 $200\mu\text{s}$ となり、熱い電子がない場合に比べて 1 桁長くなることを示した⁷⁸⁾。京大ヘリオトロンの実験では、ヘリオトロン磁場におけるオーム加熱プラズマの振る舞いについての結果が報告され、現状のヘリオトロンプラズマは電荷交換に反して、安定のために必要となる密度分布を形成できず、 $m=1$ モードの交換型不安定性に対して不安定になるとの結論が出されている⁷⁹⁾。また、阪大グループからはプラズマ中の衝撃波の発生について、異なる 3 つの方法(プラズマ・ガンによる波の駆動、セシウムのプラズマ高速流、レーザーの応用)を使用した実験結果が示された⁸⁰⁾。

4.3 第3回 IAEA 会議がもたらした日本の核融合研究への影響

第2回会議と同様に、第3回 IAEA 会議後にも日本国内では同会議の報告会が催された。1968年8月26日に開催された力特委核融合部会(第7期第8回)では、会議に出席した岡本、大西、長尾と日本へ一時帰国していた大河によって報告が行われ、これまでの2回の会議ほど画期的な発表はなかったが、着実な進歩を全般的にしているとの判断が下されている⁸¹⁾。また、同年10月11日開催のプラズマ研第29回基礎実験専門委員会⁸²⁾でも、山中より第3回 IAEA 会議を含む3つの国際会議に関する帰朝報告が行われたほか、10月14日の力特委核融合部会(第7期第9回)⁸³⁾においては、山本から第3回 IAEA 会議出席者にソ連の研究機関訪問記の執筆依頼を出したことが報告された。

ところで、第3回 IAEA 会議における内部導体系装置に対する悲観的な見方は、原研で始まっていた JFT-1 の研究および原子力委による「核融合研究開発基本計画」に影響を与えるのではないかと懸念が、研究者の間で広がっていた。例えば、第3回 IAEA 会議に出席した奥田は同会議の報告内で「内部導体系に対する不信感が過大に伝えられたかもしれない。内部導体系でスタートする原研中心の計画には微妙な心理的影響を与えはしないかと思うのは筆者だけではない」と述べている⁸⁴⁾。このような不安は、原研の核融合研究グループ長であった森も感じていたようで、原子力産業新聞主催の大河との対談では「原研の予備実験(JFT-1)はある意味でつらい実験になりそうだ」と発言している⁸⁵⁾。しかし、これに対して大河は「十分ちがった実験ができる」と述べ、さらに「プロジェクト的なことをやる非常にいい経験になる」として、日本が「核融合研究開発基本計画」に基づく研究を推進していることに賛同した⁸⁵⁾。なお、同基本計画については科技庁核融合研究運営会議の第1回会議(1969年3月26日開催)で、昭和45(1970)年度以降の考え方として、第3回 IAEA 会議で明らかとなった成果や進歩の状況を考慮しても、若干の修正程度で基本方針自体は正しいとの判断が下されている⁸⁶⁾。

その後、本章冒頭でも触れたように、第3回 IAEA 会議で提示された T-3 の成果を証明するために、英国カラム研究所のフォレスト M. J. Forrest やピーコック N. J. Peacock らのグループによってレーザーを用いたトムソン散乱による温度計測が行われた⁸⁷⁾。これは、核融合研究における本格的な最初の国際協力と位置づけられており、計測の結果はトカマク装置の有用性を立証するものとなった。このことが報告された International Symposium on Closed Confinement System(1969年9月29日～10月3日、ソ連ドブナ(Dubna)で開催)に出席していた森は、帰国後、菊池正士や山本に対して「核融合研究開発基本計画」で建設が決定していたが、この段階では「トカマク/スフェレータ両用可能の versatile 設計」として配位を検討中であった「中間ベータ軸対称性トラス磁界装置」をトカマク型にすることを進言した。山本によると、この時に菊池と森の間では「空中戦」が起こり、菊池は計画の検討・決定の経緯に曖昧さが残るとして不満をあらわにしていたという⁸⁸⁾。しかし最終的には森の意見が採用され、原研理事会での審議と核融合研究運営会議(第7回)での決定を経て、トカマク型装置 JFT-2 の建設が1970年度より始まることになった。

これに対して名大プラズマ研では、第3回IAEA会議後、同会議で発表したQP装置に関する問題が取り沙汰されることになった。その理由は、第3回IAEA会議への発表に向けて工作室がQP優先となり、さらに予算超過が生じたことについて、担当者と所長の責任が問われることになったからである⁸⁹⁾。当時、QP装置はプラズマ研の核融合指向の看板装置として、IAEA会議に論文を提出しなければならないというプレッシャーがあったために、無理をして圧縮加熱装置の増強を図ったことが予算超過と工作室占有という状況を作ってしまったという⁹⁰⁾。1968年10月4日から5日にかけて開催された第39回運営委ではこの問題が議題として取り上げられ、担当者の謹慎という厳しい案も出された⁸⁹⁾。だが、最終的には担当者および所長、運営委の不手際を反省するという表現にとどまり、担当者が「QPの後始末を行い、当分新しい具体的な事から遠ざかってもらう」として一応の決着がつけられた。

一方、同じ第39回運営委の中で、第3回IAEA会議前から検討されていた新プロジェクトのひとつである、宇尾提案の内部導体系トーラスに基づく「附加磁界4極計画」が第3回IAEA会議の結果を踏まえて見送りとされた⁸⁹⁾。そして、これに代わる低ベータトーラスによる閉じ込め研究として、ステラレータのような外部導体系トーラス装置が研究課題として取り上げられた。これは同型の方が技術面で有望であり、トカマクの思想を盛り込むことは現時点では得策ではないとの判断と、京大や原研で計画されていた内部導体系装置の研究との重複を避けた結果であった⁹¹⁾。なお、同提案の背景には天野恒雄(阪大)による発言が少なからず影響していたことが、当時の委員会議事録からうかがえる。天野は1969年5月8日のプラズマ研第2回専門委員会において、トカマクは技術的に限界を向えているためにステラレータの方が有望であり、さらにトカマクへの接続を考えるのであれば、ジュール加熱を課題にすれば良いと発言している⁹²⁾。その結果、これらの方針を踏まえて作成された専門委員会答申に基づく外部導体系トーラス装置の計画は、1969年5月22日の第43回運営委において承認され、プラズマ研における初のトーラス型閉じ込め装置JIPP-Iの建設へと結実することになった⁹³⁾。

以上から、第3回IAEA会議が日本にもたらした一番の影響は「内部導体系装置に対する悲観」であったと判断できる。そのため、会議以前から内部導体系装置による研究を計画あるいは実行していた原研と名大プラズマ研は、第3回IAEA会議の「内部導体系装置に対する悲観」という結果やその後の世界の趨勢を踏まえて、装置に関する方針を転換し、トカマクと外部導体系トーラスによる研究をそれぞれ開始することになったといえる。

5. 本章のまとめ

本章では、核融合研究黎明期と言われる1960年代における日本のIAEA会議に対する取組みと同会議の国内への影響について見てきた。第1回IAEA会議への日本国内での対応は、完全に「さぐり探り」の状態であった。1959年に巻き起こった「A-B計画論争」⁹⁴⁾を経て、小型装置での「基礎研究」(プラズマ物理学)を重視するという国内の研究方針が決定し、

名大プラズマ研が発足した直後であった当時の日本では、国際会議にしっかりと対応できる体制が整えられていなかった。同会議への国内における初動対応を担当することになった融特委も、同時期は本来の目的であった名大プラズマ研を中心とする国内の研究計画策定を重視し、IAEA 会議の性格を把握する作業までは本格的に取り組むことが出来ていなかった。そもそも、融特委が創設される際に作成された「核融合特別委員会設立趣意書」には、国際会議への対応を融特委が担うことは言及されておらず、国際会議への対応に関する体制についての根本的な不備は明らかであった⁹⁵⁾。その結果、選出された唯一の口頭発表が取消しとなり、ヨッフエ磁場などの重要な研究成果を正当に評価することも出来なかったため、第1回 IAEA 会議は日本の研究体制に特段の影響を与えることはなかったといえる。しかしその反面、国際会議への対応の重要性や国際交流を積極的に行うことの必要性を研究者たちは認識し、このときの反省が融特委での国際交流小委員会の新設へと活かされることになった。

第1回 IAEA 会議の反省を踏まえた第2回 IAEA 会議に対する国内での準備は、早い段階から熱心に行われていた。そこには、プラズマ研を中心とする各地の研究機関での「基礎研究」の進展に対して、研究者のなかに一定の自信があったことも影響していたと考えられる。また、「基礎研究」を推進した背景には、諸外国の研究者によるアドバイスもあった。例えば、米国でミラー装置の研究を先導していたポスト R. F. Post は、1960年に山本と森が彼を訪問した時に、日本が大型装置の計画をやめたのは賢明と発言しており⁹⁶⁾、プラズマ物理学の重鎮であった英国のフォン・エンゲル E. von Engel のもとを1961年に伏見が訪ねた際にも、エンゲルは「お前がこれからするのは“pure plasma physics”か、“dirty fusion research”か」と迫り、現状は各国が種々のアイディアで基礎的な問題を解決していく段階であるということを示している⁹⁷⁾。ところが、実際に第2回 IAEA 会議に出席した研究者が目玉のあたりにしたのは、小型装置による「基礎研究」から中型・大型装置を用いた核融合指向の「閉じ込め研究」への世界的な方針転換であった。その結果、会議後の日本では「閉じ込め研究」をベースとする将来計画に関する提案がいくつか出され始めた。しかし、閉口による「新研構想」や伏見の大河招聘案などは現状を否定し、急激な研究方針の転換を図るものとして研究者のあいだで受け取られ、反対意見が大半を占めてしまう。

ところが、それでも世界的な動向が「閉じ込め研究」に遷移している現状を無視できない日本では、徐々に「閉じ込め研究」を行う体制づくりを開始する。そして、原研の JFT-1 やプラズマ研の「附加磁界4極計画」など、第2回 IAEA 会議での内部導体系装置の成果に基づく研究計画も立案されていった。その最中に開催された第3回 IAEA 会議では、世界的な「トカマク旋風」を巻き起こす成果がソ連によって提示されたが、そのことよりも会議直後に国内で強調された点は、第2回 IAEA 会議で成果を出した「内部導体系装置への悲観論」であり、このことをきっかけとして、再び日本の現況が世界から遅れを取っていることが露呈する。その結果、建設予定であった装置に対する再検討が行われ、原研の JFT-2 へのトカマク配位の採用や名大プラズマ研での外部導体系装置 JIPP-I の建設へと繋がることになった。

た。

このように、1960年代に開催されたIAEA会議は国内の核融合研究体制や将来計画の議論を巻き起こすきっかけのひとつになっていた。その背景には、本章で論じたような、IAEA会議への国内での対応の確立によって、諸外国の研究成果を把握しやすい状況が構築されたことに一因があるといえる。しかし、特に第2回IAEA会議後に行われた国内の議論では、「基礎研究を重視する」と定めた当初の研究方針を転換することへの抵抗が大きく働くことになる。そのため、国内での研究方針が「閉じ込め研究」へと転換したのは、第3回IAEA会議開催後になってからであった。そして、同会議とその後の状況に基づく新装置の建設の際には、多額の費用を投じて建設される新装置が日本の独自性を確保しつつ、世界の核融合研究と太刀打ちできるかという点に関する不透明さがあった部分について、関連する委員会でのコンセンサス形成の前に、IAEA会議の出席者および同会議に基づく世界的な情勢を判断した少数名の研究者による「英断」が存在していた。これは換言すれば、IAEA会議の出席者らが中心となって、「閉じ込め研究」への口火が切られたことを意味し、その結果として、日本の核融合研究は中型・大型装置によるプラズマ閉じ込めの研究へと本格的に舵を切り、同分野において世界の研究を牽引する立場へと邁進していくことになったといえる。

文献と注釈

- 1) H. Bhabha, "Presidential Address," *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy Vol.16, record of the conference* (New York: United Nations, 1956) : 35.
- 2) 狐崎晶雄, 吉川庄一『新・核融合への挑戦 いよいよ核融合実験炉へ』講談社, 2003年, 201-202頁.
- 3) IAEA 会議の性格については、次の文献を参照のこと：関口忠「IAEA 主催「プラズマ物理ならびに核融合制御に関する研究」国際会議に出席して」『日本原子力学会誌』第4巻第7号(1962年), 59-65頁／日本学術会議核融合研究連絡会国際交流小委員会「核融合関係国際交流の現状分析と将来への提言」『核融合研究』第44巻別冊その4(1980年).
- 4) 植松英穂, 竹田辰興, 西尾成子「日本における核融合研究開発の歴史」『日本物理学会誌』第56巻第6号(2001年), 395-402頁.
- 5) 吉岡斉「大学系の核融合研究」, 中山茂他編集『[通史]日本の科学技術 第3巻』学陽書房, 1995年, 133-145頁.
- 6) 山本賢三『核融合の40年—日本が進めた巨大科学—』ERC出版, 1997年.
- 7) 宮本健郎「核融合をめざしたプラズマの研究」『日本物理学会誌』第51巻第8号(1996年), 549-556頁.
- 8) 日本の核融合研究開発の歴史は、研究の進展状況などから大まかに次のような時代区分がなされている：社団法人プラズマ・核融合学会『核融合研究発展に関する情報収集及び調査 委託調査報告書』, 1997年, 9-34頁を参照.

- (1) 「核融合研究の前史時代」：第1回ジュネーブ会議開催以前(~1955年)
- (2) 「核融合研究黎明期」：核融合研究開発に悲観的だった時期を経て、プラズマ閉じ込め研究に曙光の見え出した時期(~1960年代末)
- (3) 「核融合研究成長期」：石油危機(1973年：第1次, 1978年：第2次)の到来とともに核融合炉への期待が大きく膨らみ中小型トカマク中心に核融合研究が急速に発展し、大型トカマク JT-60 の実験が開始される時期(1970年代~1985年頃)
- (4) 「大型トカマク時代」：3大トカマクの成果や国際協力が進み、国際熱核融合実験炉 ITER 計画が進展した時期(1980年代後半~現在)
- 9) 前掲 6), 286 頁.
- 10) *Nuclear fusion : Proceedings of the Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 4-9 September 1961, Salzburg, Austria, Nuclear Fusion 1962 Supplement Part.1-3* (Vienna: IAEA, 1962-63).
- 11) 現在, 名古屋大学プラズマ研究所は京都大学ヘリオトロン核融合研究センターや広島大学核融合理論研究センターと改組拡充(組織の廃止転換を含め)され, 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所(NIFS)となっている:『核融合科学研究所十五年史』大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所, 2006年, 25-26頁.
- 12) 「核融合特別委員会(第17回)議事録」『核融合研究』第6巻第3号(1961年), 327-329頁.
- 13) 「第1回プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議 information」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID: 302-21).
- 14) 川上一郎「編集後記」『核融合研究』第6号第2号(1961年), 245頁.
- 15) 「核融合特別委員会(第18回)議事録」『核融合研究』第6巻第4号(1961年), 369-373頁.
- 16) 「核融合特別委員会(第19回)議事録」『核融合研究』第7巻第1号(1961年), 48-49頁.
- 17) 前掲 10), Part.3: 1122-1124頁. なお, abstract では伏見は阪大, 長尾は東北大所属になっている.
- 18) 「核融合特別委員会(第20回)議事録」『核融合研究』第7巻第2号(1961年), 134-138頁.
- 19) Yu. V. Gott, M. S. Ioffe, V. G. Telkovsky, “Some new results on confinement in magnetic traps,” 前掲 10), Part.3(1963): 1045-1047/English translation: 1284.
- 20) L. A. Artsimovich, “Controlled Nuclear Fusion Research, September 1961: Review of Experimental Results,” 前掲 10), Part. 1(1962): 15-20/邦訳: 吉村久光『核融合研究』第8巻第5号(1962年), 594-604頁.
- 21) “Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research Provisional Program” 『核融合研究』第7巻第2号(1961年), 139-148頁.
- 22) Tasaburo Yamada et al., “The Theta Pinch Device of the Electrotechnical Laboratory in Japan”

- 『電気試験所彙報』第26巻第2号(1962年), 51-66頁.
- 23) 電気試験所機器部プラズマ研究室『電試における核融合研究の報告書』, 1967年, 16頁.
 - 24) 木原太郎「プラズマ物理核融合会議報告」『核融合研究』第7巻第4号(1961年), 329-332頁.
 - 25) つまり, 電試からの出席者であった石井は「山田の代理」として会議に出席したわけではなかった. 石井の会議出席については, 『電試ニュース』140号(1961年)8頁の中に記述がある.
 - 26) 現に, 山田は1958年の第2回ジュネーブ会議や1960年の国際プラトニウム冶金燃料会議等に出席するにあたって, 電気学会や日本原子力産業会議などから旅費の支給を得て渡航している(『電試ニュース』104号(1958年), 8頁および『電試ニュース』124号(1960年), 7頁).
 - 27) 『日本物理学会第16回年会講演予稿集』第3分冊, 日本物理学会(1961年), III-iii頁.
 - 28) 「核融合特別委員会(第22回新旧合同委員会)議事録」『核融合研究』第9巻第1号(1962年), 107-110頁.
 - 29) 嵯峨根遼吉記念文集出版会『嵯峨根遼吉記念文集』, 1981年, 235-252頁(第2部 座談会, 核融合研究の推進).
 - 30) 前掲4), 397頁.
 - 31) 前掲6), 88頁.
 - 32) 「核融合特別委員会(第30回)報告」『核融合研究』第13巻第4号(1964年), 423-433頁.
 - 33) 「第31回核融合特別委員会報告」『核融合研究』第14巻第5号(1965年), 660-666頁.
 - 34) 第2回IAEA会議国内選考委員会関係史料, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:219-09).
 - 35) 「第32回融特委報告(新旧合同委員会)」『核融合研究』第14巻第6号(1965年), 829-836頁.
 - 36) 寺嶋由之介「編集後記」『核融合研究』第14巻第5号(1965年), 693-695頁.
 - 37) 「第33回核融合特別委員会報告」『核融合研究』第15巻第4号(1965年), 477-487頁.
 - 38) 「核融合懇談会総会報告」『核融合研究』第15巻第2号(1965年), 92-103頁.
 - 39) 森茂『核融合海外出張報告(JAERI-memo 第2106号)』, 日本原子力研究所, 1965年.
 - 40) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of a Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research held by the International Atomic Energy Agency at Culham, 6-10 September 1965, Proceedings Series, Vol.1-2, (Vienna: IAEA, 1966).*
 - 41) T. Ohkawa et al., “Toroidal multipole confinement experiment,” 前掲40), *Vol.2(1966)* : 531-544.
 - 42) Lyman Spitzer, Jr., “Controlled Nuclear Fusion Research, September 1965 : Review of Experimental Results,” 前掲40), *Vol.1(1966)* : 3-11.
 - 43) K. Matsuura et al., “Ion Cyclotron Resonance Heating of the QP Plasma,” 前掲40), *Vol.2(1966)* :

863-876.

- 44) H. Ito et al., “Dense Plasma Produced by a Cusp Injection,” 前掲 40), Vol.2(1966) : 419-426.
- 45) 長尾重夫「核融合国際会議に参加して」『日本物理学会誌』第 21 巻第 1 号 (1966 年), 55-57 頁.
- 46) 『日本物理学会第 20 回年会講演予稿集』第 4 分冊, 日本物理学会 (1965 年), 4-iv 頁.
- 47) 「第 34 回核融合特別委員会報告」『核融合研究』第 15 巻第 5 号 (1965 年), 598-610 頁.
- 48) 「カラム会議研究報告会プログラム」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID : 219-09).
- 49) 「昭和 40 年度第 4 回常任委員会報告」『核融合研究』第 15 巻第 5 号 (1965 年), 614-618 頁.
- 50) 「核融合懇談会総合メモ」『核融合研究』第 15 巻第 5 号 (1965 年), 611-613 頁.
- 51) 核融合・プラズマ研究将来計画小委員会(委員長: 関口忠)『核融合・プラズマ研究白書』, 1965 年, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID : 056-09-203).
- 52) 「第 2 次将来計画小委員会地区別討論会メモ(第 1 回, 第 2 回)」, NIFS アーカイブ室史料(ID:161-14-08).
- 53) 日本学術会議原子力特別委員会核融合部会『プラズマ核融合将来計画(第 2 次案)』, 1966 年, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID : 143-54).
- 54) 原子力委員会『原子力開発利用長期計画』, 1967 年, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID : 002-10).
- 55) 前掲 54), 68 頁.
- 56) 原子力委員会核融合専門部会『核融合専門部会報告書』, 1968 年, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID : 002-19-03).
- 57) 前掲 6), 105-109 頁.
- 58) 日本原子力研究所『日本原子力研究所年報 昭和 43 年度』, 1968 年, 60-62 頁.
- 59) 名古屋大学プラズマ研究所 25 年史編集委員会『プラズマ研究所 25 年史』, 昭和 61(1986) 年 12 月, 49-54 頁.
- 60) 「第 23 回運営委員会議事録 資料 1 Q.P.プロジェクト」『核融合研究』第 16 巻別冊 (1966 年), 13-15 頁.
- 61) 前掲 59), p.68-78 / 「第 42 回運営委員会報告」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID : 201-10).
- 62) 「第 28 回運営委員会議事録」『核融合研究』第 18 巻第 5 号 (1966 年), 494-502 頁.
- 63) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of the third International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency at Novosibirsk, 1-7 August 1968, Vol.1-2*, (Vienna: IAEA, 1969).
- 64) 前掲 5), 137-138 頁.
- 65) 「川崎便りその 4」『核融合研究』第 20 巻第 1 号 (1968 年), 135-136 頁.

- 66) 「第34回運営委員会報告」『核融合研究』第20巻第6号(1968年), 595-604頁.
- 67) 「ソビエト国内研究所団体見学の案内—ノボシビルスク会議に関連して—」, NIFS核融合アーカイブ室史料(ID:326-12).
- 68) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第7期第6回新旧合同)」『核融合研究』第21巻別冊(1968年), 75-87頁.
- 69) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第7期第7回)」『核融合研究』第23巻別冊その1(1969年), 1-17頁.
- 70) 山中千代衛「ノボシビルスクの第3回プラズマ物理と核融合研究国際会議に出席して」『超高温研究』第6巻第2号(1969年), 60-67頁.
- 71) L. A. Artsimovich et al., “Experiments in Tokamak devices,” *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : English translations of the Russian papers presented at the third International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research held at Novosibirsk, USSR, 1-7 August 1968, Nuclear fusion ; special supplement 1969* (Vienna : International Atomic Energy Agency, 1969): 17-24.
- 72) S. Yoshikawa et al., “Linear multipole and spherator experiment,” 前掲63), *Vol.1*(1968) : 403-424.
- 73) T. Ohkawa et al., “Plasma instabilities in Gulf General Atomic multipole device,” 前掲63), *Vol.1*(1968) : 329-337.
- 74) L. A. Artsimovich, “Survey on closed plasma systems (Translation of previous paper),” 前掲63), *Vol.1*(1968) : 11-18.
- 75) H. Ikegami et al., “Characteristics of microinstabilities in a hot electron plasma,” 前掲63), *Vol.2*(1969) : 423-431.
- 76) A. Miyahara et al., “A theta pinch experiment of a very low density plasma preheated by ion cyclotron resonance heating (QP-machine),” 前掲63), *Vol.2*(1969) : 619-628.
- 77) R. Itatani et al., “Suppression of drift wave in a cesium plasma by externally applied AC electric fields,” 前掲63), *Vol.1*(1968) : 649-658.
- 78) K. Sato et al., “Confinement of collision-dominated plasma and production of hot electron plasma in a mirror θ -pinch,” 前掲63), *Vol.2*(1969) : 657-666.
- 79) K. Uo et al., “Behaviour of the ohmically heated plasma in heliotron magnetic field,” 前掲63), *Vol.1*(1968) : 217-224.
- 80) C. Yamanaka et al., “Experiments on collisionless shock-waves in plasma,” 前掲63), *Vol.1*(1968) : 103-117.
- 81) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(案)(第7期第8回)」『核融合研究』第22巻別冊(1968年), 5-19頁.
- 82) 「第29回基礎実験専門委員会会議事録」『核融合研究』第23巻別冊その1(1969年), 47-50頁.

- 83) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第7期第9回)」『核融合研究』第22巻別冊その2 (1969年), 31-40頁.
- 84) 奥田孝美「感想」『超高温研究』第6巻第2号 (1969年), 81-82頁.
- 85) 『原子力産業新聞』第442号(昭和43年9月12日付), 4-5面.
- 86) 「第1回核融合研究連絡会議報告」『核融合研究』第23巻別冊その2 (1969年), 12-18頁.
- 87) M. J. Forrest, N. J. Peacock, D. C. Robinson, V. V. Sannikov, P. D. Wilcock, *Measurement of the Parameters in TOKAMAK T3-A by Thomson Scattering*, CLM-R 107 (1970).
- 88) 前掲6), 112-113頁.
- 89) 「第39回運営委員会報告」『核融合研究』第22巻別冊その2 (1969年), 18-26頁.
- 90) 黒田勉(核融合研名誉教授)との私信, 2010年9月18日.
- 91) 「第2回専門委員会議事録(案)」『核融合研究』第23巻別冊その2 (1969年), 43-86頁.
- 92) 「第43回運営委員会議事録(案)」『核融合研究』第23巻別冊その2 (1969年), 95-108頁.
- 93) 前掲59), 68頁.
- 94) 「A-B計画論争」については, 本稿第2章を参照.
- 95) 早川幸男, 木村一枝「核融合研究事始め(2)」『核融合研究』第57巻第5号 (1987年), 271-279頁(特に278頁).
- 96) 山本賢三, 森茂「欧米の現況(IV) [米国の部 その2]」『核融合研究』第5巻第6号 (1960年), 640-659頁.
- 97) 伏見康治「海外の核融合研究の現状と今後の見通し」『日本原子力学会誌』第4巻第4号 (1962年), 263-268頁.

第5章 「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議」の 会議報告論文の比較

1. 本章の背景と目的

現在、核融合研究の分野における国際会議は数多く存在するが、その中でも歴史が古く、最も重要な国際会議として挙げられるのが、前章でも取り上げた国際原子力機関(IAEA)主催の「核融合エネルギー会議」(Fusion Energy Conference)である。

核融合エネルギー会議の前身である「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議」(The International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 以下 IAEA 会議)¹⁾は回を重ねるごとに、核融合研究の情勢を踏まえて、会期中に設けられる Session も変化していった。例えば、トカマク(Tokamak)装置に関する実験発表の Session を見ると、第3回会議(1968年)まではトーラス装置の一つとしてトロイダル・ピンチ装置やステラレータ(Stellarator)のような他型式の装置と同じ Session 内で報告されていた²⁾。ところが、第4回会議からトカマク装置に関する Session が個別に設置されることになる³⁾。その契機となったのは、第3回会議におけるソ連のトカマク T-3 が提示した実験結果であった。前章までも触れたように、これは当時としては画期的で、もしこの結果が本当であれば核融合研究における大きな進展とされた。しかし、その結果を西側諸国の研究者は安易に受け入れることが出来ず、ソ連の温度計測の方法が間違っていたのではないかとの疑惑が持ち上がった。そこでソ連のトカマク研究を指揮していたアルティモービッチ L.A.Artsimovich は、英国カラム研究所のフォレスト M.J.Forrest やピーコック N.J.Peacock 等のチームをクルチャトフ(Kurchatov)研究所に招き、当時最先端技術であったレーザーによる T-3 の温度計測を許可した⁴⁾。その結果、会議で提出された T-3 の温度は正しかったことが証明され、1969年にソ連のドブナで開催された International Symposium on Closed Confinement System で全世界にトカマクの有用性が提示されると、各国でトカマク型の装置が数多く造られることとなった。第4回 IAEA 会議(1971年)ではトカマクに特化した Session が理論・実験を併せて4つも設けられ、ソ連からの発表に加えて、米国や日本など多くの国々の研究機関から成果が27件提出された⁵⁾。特に、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所(PPPL)の Stellarator-C(Model-C Stellarator)が T-3 の成果を受けて、1970年に ST としてトカマク型に改造されたことは注目を浴びた。その後、各国でのトカマク研究が着実に進展し、T-10 や PLT, Doublet-III と言った第2世代トカマクが登場してきた1970年代後半開催の第6回(1976年)⁶⁾、第7回(1978年)⁶⁾の会議ではトカマクに関する Session が8つも設置され、報告数も増加している。このように、トカマクが磁場閉じ込めの最も有力な手段として研究が進展するにつれて、IAEA 会議での報告数や Session も飛躍的に増加していることがうかがえる。この他にも、第4回会議からは炉工学の Session が追加され⁷⁾、会期についても当初は3年毎に開催されることとなっていたが、研究の進展を踏まえて、1976年開催の第6回会議から2年毎の開催に変更されている⁸⁾。また第7回会議において、ソ連でトカマク研究を先導し、核融合研究の国

際交流促進に貢献したアルティモービッチの功績を讃えて、Artsimovich Memorial Lecture が新設され⁹⁾、さらに第 12 回会議(1988 年)からは、国際熱核融合実験炉(ITER)計画始動にもなって、ITER Session が設けられた¹⁰⁾。そして、第 16 回会議(1996 年)からは、会議名称が現在の核融合エネルギー会議に変更され、核融合材料や慣性核融合ターゲット製造技術などについての Session が追加された¹¹⁾。なお、同会議はこれまでに日本で 3 度開催されており、日本原子力研究開発機構(JAEA)の前身である日本原子力研究所(原研, JAERI)が、IAEA との共催として国内の host institute を務めている¹²⁾。

本稿第 4 章でも述べたことだが、IAEA 会議は核融合研究開発史を調査・研究するにあたって、重要な中心的指標の一つとして取り扱われてきた。これまでの核融合研究開発史を取り扱った先行研究において、例えば、植松英穂ら¹³⁾や山本賢三¹⁴⁾、宮本健郎¹⁵⁾、ブラームス C.M.Braams ら¹⁶⁾は著書や論文の中で同研究分野の進展を論じる際に、IAEA 会議での発表を必ず引用している。しかし、上述した T-3 の例のように、会議で発表された各国の研究成果がすぐに研究者間の同意を得たわけではなかった。ところが、先行研究にはそのような観点で核融合研究の変遷を言及したものは見られない。

他方、各発表に対する研究者の見解を探る史料として、研究者が執筆した会議報告論文を挙げるができる。会議報告論文は、会議に出席した研究者が帰朝報告として、会議の概要やトピックスを記した速報のようなもので、会議の発表に対する個人的見解も書かれている場合が多い。また、IAEA 会議の場合、会議最終日に会議の総括講演が行われる。この総括講演も会議報告論文と同様、担当する研究者の私見が含まれており、現在 epoch-making と位置付けられた発表の当時の評価を知ることが可能となる。

そこで本章では、前章で論じた 1960 年代に開催された IAEA 会議への日本の取組みを踏まえて、第 1 回から第 3 回までの IAEA 会議に対する各国研究者の執筆した会議報告論文を調査し、当時の研究者が各発表に対してどのような見解を示していたのかを概観する。特に、核融合研究開発に関する通史において epoch-making として評価されている発表に対して、会議開催当時に日本人と諸外国の会議出席者どのような見解を持ったのか。また、それが通史と違いがあるのかを検証する。

2. 「煉獄」の時代と Ioffe-bar : 第 1 回 IAEA 会議(1961 年)

第 2 回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ会議)での各国による核融合研究の公開から 3 年が過ぎた 1961 年 9 月に第 1 回 IAEA 会議は開催された。前章でも触れたように、IAEA の Program Committee が口頭発表に選出した発表は 110 件であった¹⁷⁾。以下に、口頭発表に選ばれた各国別の発表数を記す。

表 1. 第 1 回 IAEA 会議における各国別口頭発表数(Proceedings に基づく)¹⁷⁾

	Session I	Session II	Session III	Session IV	Session V	Session VI	Session VII	Session VIII	Session IX	国別合計
Sweden	2	1	0	0	0	1	0	0	0	4
Fed.Rep.of Germany	1	0	1	0	8	0	1	1	0	12
UK	2	0	1	1	3	0	7	0	0	14
USA	2	10	3	5	3	1	1	2	5	32
France	0	0	2	2	0	2	3	2	1	12
Italy	0	0	0	0	2	3	0	0	0	5
Japan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Netherlands	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
the Soviet Union	2	1	2	6	3	3	6	2	5	30
Session別合計	9	12	9	14	19	11	18	7	11	110

また、会議に出席した関口忠の会議報告論文によると、各 Session の分類と会議日程は以下の通りであった¹⁸⁾。

開会式(第 1 日 ; 9 : 30 ~ 10 : 00)

Session I : 特殊なプラズマ閉じ込め(第 1 日 ; 10 : 00 ~ 13 : 00)

Session II : 磁気ミラー型及びステラレータ型の安定性
(第 2 日 ; 9 : 00 ~ 13 : 00)

Session III : 理論的諸問題(第 2 日 ; 15 : 00 ~ 18 : 00)

Session IV : DCX, OGRA 型の諸問題 ~ 高エネルギー粒子ビームの磁気ミラーへの注入
について(第 3 日 ; 9 : 30 ~ 13 : 00)

Session V : テータピンチ型の諸問題(第 4 日 ; 9 : 00 ~ 13 : 00)

Session VI : 高温発生に関する諸問題 ~ エネルギー放射, プラズマ銃, 超高速衝撃波等
(第 4 日 ; 15 : 00 ~ 18 : 00)

Session VII : ピンチ装置に関する諸問題(第 5 日 ; 9 : 00 ~ 13 : 00)

Session VIII : 理論的諸問題(第 5 日 ; 15 : 00 ~ 18 : 00)

Session IX : プラズマ中の振動および波動(第 6 日 ; 9 : 00 ~ 13 : 00)

総括論評・閉会式(第 6 日 ; 16 : 00 ~ 17 : 30)

このほか、本会議の Session 終了後には各国の要望で、以下の 14 部門に分けられた非公式討論会(Informal discussion meetings)が開催された¹⁹⁾。非公式討論会は各部門で 1~3 時間ずつ行われ、本会議では議論が尽くせなかった題目の内容、或いは口頭発表しなかった著者の発表アブストラクトに基づいて、かなり立ち入った活発な討論が行われたという¹⁹⁾。

1. Micro-Instability
2. Rotating ($E \times B$) as a Means of Injection
3. Pinch Stability

4. Chemical Explosions for Plasma Physics
5. Enhanced Diffusion across a Magnetic Field
6. Mirror Containment Experiments
7. Application of Masers to Plasma Physics
8. Particle Injection
9. Collisionless Shock Waves
10. Angular Momentum Considerations
11. Theta Pinch
12. Rotating Plasmas
13. Microwaves, Plasma Oscillations and Instabilities
14. Electromagnetically Driven Shocks

前章でも触れたように、当時の epoch-making と評された第 1 回 IAEA 会議の成果は、ヨッフェ M.S.Ioffe らが発表した Ioffe-bar の付加による複合磁場ミラー装置でのプラズマ閉じ込めの実験であった²⁰⁾。Ioffe らの実験では、既存のミラー装置に安定化ワインディング(Ioffe-bar)を付加させることによって、系の磁場は水平方向ばかりでなく、放射状方向にも増加させることが可能となり、ミラー磁場を横切ってプラズマが流出する原因となる対流型不安定性の発展を防ぐとされた。なお、Ioffe らの発表は会議最終日に post deadline paper として急遽追加されたもので、事前に IAEA より通達された provisional program には同発表が含まれていなかった²¹⁾。

他方、会議の実験部門に関する総括を行ったアルティモービッチは、「研究現状に関しては、全体として、1958 年のジュネーブ会議よりもはるかに進歩のあとがみられることは疑いの余地がない」、「実験結果はそのいずれにも、将来の研究促進に貢献し得る価値を認めることができる」と述べる一方、制御核融合の問題は 20 世紀の自然科学の成功を生んだ全ての他の科学技術的問題の後に置き去りにされていると評した。また、当初容易であるとされた核融合炉実現の根拠はなくなり、核融合炉がすぐにでも出来るという希望は「罪深き人々の煉獄(Purgatory)を避けて天国(Paradise)へ行けると考える希望に似ている」、そして「制御核融合の問題が解決するのかという疑問があることは疑いなく、煉獄の中に我々がどの位長くいることになるのかは、誰にも分からない」と発言した²²⁾。これに対して、理論部門の総括を行ったローゼンブルース M.N.Rosenbluth は「理論に関わる者が、実験研究者に対する正しい熱核融合装置のアドバイスを怠ったのは不幸な事実であり、我々の長年にわたる追究がプラズマ・核融合炉の不可能であるべき理由の何一つも見出していないことも事実である」とし、さらに「私の本心を表明するならば、今後遭遇するであろう核融合とのより激烈な戦いに敗れさえしなければ、人類による核融合問題の解決は 20 年ぐらいで実現するであろう」と予言した²³⁾。この 20 年という年数は、バーバの第 1 回ジュネーブ会議での発言になぞられたものであったと思われる。また、ローゼンブルースは第 1 回 IAEA 会議の開催によって、協力と友情の精神に基づき各国の研究資料(成果)が交換されたことを称賛した。

ところで、山本賢三は著書『核融合の40年』において、第1回IAEA会議での成果を次のようにまとめている²⁴⁾；

第1回プラズマ物理制御核融合国際会議(IAEA主催)は1961年9月4~9日、オーストリアのザルツブルクで開かれた。発表論文は250編を超えたが、われわれの目指す超高温領域の実現についてはまだまだ入り口に近付くことができた程度とあってよかった。分類すると、30種類を超える各種不安定性が存在し、そのため熱損失が起こって温度低下を起こす。密度の高いプラズマは数百マイクロ秒以上保持できず、また真空容器壁から放出される吸着ガスおよび表面材料のスパッターにより不純物混入が起こり、大きい輻射損失をまねく。さらに残留中性ガス分子が放出され、熱損失が起こる。1958年のジュネーブ会議のときと比べ、これらの困難な問題については全く進歩がなかった。

また、宮本健郎の著書『プラズマ物理・核融合』²⁵⁾での第1回IAEA会議の記述を取り上げると、同会議では英国のZETA(ゼータ、逆転磁場ピンチ)、米国のStellarator-C(ヘリカル型)、ソ連のOgra(オグラ、ミラー装置)などに加えて、「シーターピンチの実験が直線ピンチに代わって登場してきた(Scylla(シラ)、Thetatron(テータトロン))」という。しかし、これらの装置は「最初の期待に反して多くの不安定性に悩まされ続けた」と述べている。その後、宮本は上述したアルティモービッチの「煉獄」発言やヨッフエらの成果を挙げ、特に最小磁場(min.B)の概念の重要性を確認したヨッフエの実験は「すぐにその重要性が世界的に認識された」と評している。

このように、第2回ジュネーブ会議からの大きな進展はなく、アルティモービッチが称した「煉獄」の時代が訪れたというのが、第1回IAEA会議に対する一般的な見解である。しかし、この現状を換言すれば、第1回IAEA会議における発表を日本人研究者や諸外国の研究者が当時どのように把握していたのかは、先行研究ではほとんど言及されていないことを意味する。

以上のような会議概要を踏まえて、本節では第1回IAEA会議の出席者による会議報告論文の内容を日本人と諸外国の研究者で比較する。なお、前章で述べたように、第1回IAEA会議の日本国内への影響は少なかった点を踏まえて、以下では分野を特定せず、各会議報告論文に記載された内容を全般的に取り扱うものとする。

2.1 日本人の見た第1回IAEA会議

日本から出席した研究者の中で、会議報告論文を執筆していたのは関口忠、小島昌治、木原太郎、伏見康治の4名であった。このうち、関口、小島、木原は日本物理学会第16回年会で、木原と伏見は日本学術会議第22回核融合特別委員会(融特委)で第1回IAEA会議の報告を行っている。

上記の会議概要でも引用した関口の会議報告論文では、会議の内容が全体的に論じられている。まず、研究の世界的趨勢に関して、関口はアルティモービッチの総括講演を引用し

ている。しかし、講演内容で取り上げられているのは、ジュネーブ会議以来の3年間で、研究の進展は確かに著しいものであったが、科学技術上の困難さ、問題点も次第に分かってきて、核融合制御の問題が当初考えられていたほど安易なものではなく、一攫千金的には成功しそうもないことが明らかになったという点や、超高温プラズマの基本的な性質、電磁場中でのふるまいが次第に明確になりつつあることは着実な進歩で、今後はこれらの基礎知識で核融合制御を目指す研究のテンポを速める可能性が大きくなったといえる点などで、「煉獄」発言には一切触れていない。一方、各種高温プラズマ発生装置の進展状況としては、Zピンチ、テータピンチ、ステラレータ、磁気ミラー、カスプの五つの型に分類して、その内容を報告している。ピンチ型に関しては、会議ではトーラスも直線状も本質的に不安定であるとの評価が下され、プラズマ診断法開発や不安定性の研究対象としてのみに利用されていたが、プラズマ柱を円筒殻状に圧縮して安定性を改善し得る可能性のある“Tublar Pinch”や“Hard-Core Pinch”，さらに「ドーナツ状容器に2重に螺旋状巻線を施し高周波電流による回転表面磁界によって安定性を増そうとする“Alternating Pinch”(オランダ)等の特殊なもの残されて研究が続けられている」²⁶⁾とある。これに対して、テータピンチは各国でかなり人気があり、集中的に研究が行われている装置の一つであった。関口によると、「小型簡便で、しかもこの方法以外に上記のような高密度高温のプラズマを得る手段が現在のところない」ので、高温プラズマの性質研究には「甚だ具合がよい」ことが、各国で盛んに研究されている理由であるという²⁷⁾。その中でも、米国の実験にて「荷電粒子密度 10^{16}cm^{-3} 、温度数千万 $^{\circ}\text{C}$ 以上のプラズマが得られており、核融合反応が起っている証拠となる熱中性子およびX線も観測されている」という例が挙げられていた。しかし、高温の持続時間が極めて短く(数 μ 秒程度)、一般的には「核融合炉という実用的見地からは甚だ疑問視されている」ことも併記されていた²⁷⁾。ステラレータ型装置に関する関口の記述には、明かな誤記が見られる。彼の報告で、ステラレータ型の例には米国プリンストン大学の Stellarator-C 以外に、「ソビエトの“Tocomac”等」²⁷⁾を挙げている。これはトカマク(Tokamak)のことを指していると考えられ、当時ソ連の研究内容が正確に把握できていなかった日本の状況を示すものといえる。発表された実験データは、(1)大型装置である Stellarator-C の建設がほぼ完了して実験を開始し、予備実験でかなり長い閉じ込め時間が示されたという報告があったこと、さらに(2)小型・中型装置においては第一段階のオーミック加熱(Ohmic heating)において異常に速い荷電粒子の損失が観測されており、閉じ込め時間は数百 μ 秒程度に過ぎず、原因が究明されつつあることを述べている。磁気ミラー型については、米国オークリッジ研究所(ORNL)の DCX やソ連の Ogra, さらに米国ローレンス放射線研究所(LRL)の断熱圧縮実験の結果が記されている。特に、LRL の実験結果に関しては、「2~3 段階にプラズマの圧縮および移動を継続的に行なう“多段圧縮(Multistagepression)”によって 10^{13}cm^{-3} 程度の密度と数千万 $^{\circ}\text{C}$ のイオン温度を有するプラズマを数百 μ 秒の間閉じ込めることに成功している」として注目していた²⁷⁾。なお、関口は会議後の米国 LRL からの公式発表も取り上げて、核融合反応に必要な密度と温度に近いプラズマを約 40ms 閉じ込めることに成功したことを「ま

だその現象自体充分明確ではないにしても非常に明るい見通しを与えたものであることは疑いないように思われる」と評した²⁸⁾。その一方、関口の報告には Ioffe-bar の実験結果については一切の記載がなかった。最後にカusp磁場の研究は理論、実験ともに各国で急速に開始されていて、会議では低温・低密度プラズマでの不安定性やカusp磁場の一部分からの粒子損失に関して活発な議論が交わされたとある。

このような関口の報告と比べると、小島昌治の報告内容は基礎実験に限定されている²⁹⁾。彼はプラズマとビームの相互作用、磁場中の拡散、イオン波、プラズマ診断の四項目に分けて、第1回 IAEA 会議と同時期に開催された第5回電離気体現象国際会議(The Fifth International Conference on Ionization Phenomena in Gases)での発表内容を併記するかたちで取り上げている。プラズマとビームの相互作用について、小島の会議報告論文ではフランスのエティエヴァン C.Etievant 等の発表内容がかなり具体的に記述されていた。エティエヴァンの実験は、チェンバー中にある水素または重水素に電子銃からのビームを照射することでプラズマを生成し、ビームとの相互作用による電子密度の変動 Δn および不安定性を確認している。そして、ビームの加速電圧 2kV、ビームの電子密度 $7 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$ 、測定のマクロ波周波数 9000Mc、チェンバーの圧力 10^{-3}mmHg の各パラメータのもとで、磁場を強くすると $\Delta n/n$ が 1 に近付き、装置内のプラズマ柱が破壊されることが認められた。これに加えて、チェンバー中の探針を通して振動のスペクトルが調べられ、高周波と低周波の振動を観測した点も小島の報告では述べられていた。一方、異常拡散に関して、小島は先ずゲーリケ G.von Gierke らの実験を取り上げている。通常のプラズマでは電子の方がイオンよりも早く拡散するため、プラズマの表面は負の電位になるが、磁場をかけると電子の方が強く曲げられるためにかえって遅くなることから、表面は正の電位になる。このことが異常拡散に関係するかを確認したのが、ゲーリケの実験であった。彼らは探針を使って、プラズマ柱の半径方向の電位分布を詳しく測定している。その結果、期待通りの電位分布となっていることは確かめられたが、異常拡散との関係性はないことが確認され、ヘリカル磁場を付加した実験ではカドムチェフ B.B.Kadomtsev の理論を支持する結果を示したとある。一方、フランスのボナル J.F.Bonnell 等の実験では電子温度を変え、プラズマ中のビームの速さと熱運動の速さとの相対的割合を変えた実験をしているが、結果は異常拡散の指標となる磁場 B_c が電子温度に依存せず、ビームとプラズマの相互作用と異常拡散との関係は否定的な結果となっていたこと、また米国モットレー R.W.Motley がステラレータ装置でイオン波の励起によって拡散が強められることを実験から確認していることも、小島の報告では簡潔に触れられていた。イオン音波の実験については、第5回電離気体現象国際会議に関する報告が中心で、第1回 IAEA 会議の内容は米国のフック W.M.Hooke による分散関係と、ソ連のシネルニコフ K.D.Sinelnikov が示したイオン波の不均一磁場による減衰の実験だけが取り上げられているだけであった。報告の最後にあるプラズマ診断の内容では、小島は各装置による診断方法や測定対象とするパラメータの違いを指摘している。例えば、ZETA や Alpha(α -device)は診断のためのテストプラズマを提供する装置という意味合いでは、「多重電離イオンの供給

源」として性能が確かめられたのに対して、ミラー型装置の DCX や Ogra では、電子やイオンのサイクロトロン共鳴の検出が目的とされたという。また、Scylla や Thetatron では中性子や X 線の測定が行われ、中性子の検出や放射線の測定によってプラズマの崩壊や不安定性が確認されている。以上のような報告を踏まえて、小島は全ての問題はプラズマの不安定性と関係していて、「各研究は振動とか拡散とかいつでも、それだけの研究にとどまらず不安定性という立場から眺めるという傾向が強いように見受けられた」と評した³⁰⁾。そして、「基礎研究といつでもその規模は、机の上の小さな放電管」だけではなく、「ZETA が真空紫外光学の光源として役立つている」ように、大型装置も「基礎研究や測定法の研究に貢献している」と評価した³⁰⁾。そして、小島は「小型では理論通りにいつでも大型にすると予期しない現象がでてくるという例も多く、基礎的な問題はますます増加している」と述べて、報告を締め括っている³⁰⁾。

『核融合研究』に掲載された木原の会議報告論文³¹⁾は、会議への各国出席者数といった概要に関する記載がほとんどで、個別の研究内容については一切触れられていない。その中でも、会議最終日の総括講演をアルティモービッチとローゼンブルースが担当し、「今後 20 年以内に熱核融合の制御が実現できるであろう」という言葉で結ばれ、閉会式に移ったこと³²⁾、また日本人出席者のうち、発表論文を提出した小沢、関口、木原は非公式討論会で自著論文の内容に関連して、それぞれ講演を行い、木原自身の講演には「セレンコフ輻射に関する質疑応答が 10 分以上つづいた」ことが記されていた³³⁾。

一方、伏見の第 1 回 IAEA 会議に関する報告は、さまざまな文献史料から確認できる。例えば、1961 年 12 月 20 日に行われた欧米の研究機関視察に関する講演記録³⁴⁾では、第 1 回 IAEA 会議で「ソビエトの研究者たちが、プラズマ中の波動現象をしらみつぶしに徹底的に扱っている印象を受けた」とある³⁵⁾。その一方で、伏見は「波動現象そのものの扱い方については、われわれは従来もよくなれているのであって、問題はプラズマの理論的なモデルと、現実のプラズマの不一致にある」と指摘した³⁵⁾。また、第 1 回 IAEA 会議で中心人物となったレーナルト B. Lehnert が、「磁極をはさんだプラズマの磁極間の往復振動が flute instability でこわれる時間を測定し、これが電磁流体力学での理論計算より非常に長い」と発表したことについて、会議で大論争があったことに言及している。この原因について、伏見は「プラズマの形状についての単純な理想化」にあると述べ、次のように見解を示した³⁶⁾；

・・・電磁流体力学では普通プラズマを真空中に、表面により画然と区切られた一様な電導体柱として扱うが、現実のプラズマは中心が密で、いつのまにか薄くなって真空と続いている。そこでこうした表面遷移層と同程度の大きさの波動を取り扱う時は、従来の電磁流体力学の理論がつかずくのは当然である。このように実験が理論より明るい結果を示す面と同時に、暗い面も出てきた。すなわち、従来の電磁流体の仮定を一步精密化すると、安定と考えられていたものが不安定となったり、またその逆もあつたりで、核融合の将来は明暗の 2 相があるといえる。

このほか、伏見が諸外国を歴訪中に名古屋大学プラズマ研究所(プラズマ研)関係者に送った

書簡のなかにも第 1 回 IAEA 会議に関する記載がある³⁷⁾。第 1 信は長尾重夫に宛てたもので、主内容はドイツのマックス・プランク(Max-Planck)研究所を見学した時の所感であるが、第 1 回 IAEA 会議についても以下のような記載がある³⁷⁾；

前のジュネーブの会合[本稿著者注：第 2 回原子力平和利用会議のこと]から、この会合までの 3 年間、何も本質的に新しい事は出なかったという Rosenbluth の「とりまとめ」報告は、他の面ではもちろん、この会合の有意義なことを説いていたにせよ、いささかさびしい次第です。・・・

・・・この会合に出た学問的内容は、口頭で述べたのはみんな簡単なアブストラクトみたいなもので、厩大な論文が全部しょっているわけです。私は、もらったものは、学問以外のものも、船便の小包で送りました。

また、高山一男に宛てた第 2 信にも、第 1 回 IAEA 会議の非公式討論会に出席した状況が記されている³⁷⁾；

正式の会の他に、そこで十分論じつくされなかった問題について、非公式討論会がひらかれていますので、その題目だけをならべておくと、何が問題となっているかがわかりましょう。

1. Micro instability
2. Rotating E×B as a means of injection
3. Pinch Stability
4. Chemical Explosions for Plasma Physics
5. Enhanced diffusion across a magnetic field
6. Mirror containment experiments
7. Application of masers to plasma physics
8. Particle injection
9. Collisionless shock waves
10. Angular momentum considerations
11. Theta pinch
12. Rotating plasmas
13. Micro waves, plasma oscillations and instabilities
14. Electromagnetically driven shocks

このうち、私が出たのは 5 と 7 と 13 だけで、5 は関口さんが、13 は木原さんが活躍されるので出たわけです。7 は maser に対する期待で何が出るかと思ったのですが、オランダの質量分析屋さんの Kistmaker が高速の O イオン(?)を Cu のターゲットにぶつけて、Cu の高励起原子を大量に作る話。

MIT の Bekefi(ベケフィと発言)が、論文番号 171 号の内容を紹介した程度で、討論にはなりませんでした。とくに、ロシア人は何も知らないかの如き様子でした。

Broun-Bekefi の論文は、Cyclotron radiation の maser 的機構によって、高準位に偏った

エネルギー分布のプラズマが、輻射を出しておとなしい分布になる。その不安定性を問題としたものです。

これら以外にも、伏見の日記には会議中の日本人の動向が詳細に記されている。会議が始まった9月4日付の日記には、朝になると宿の自室前に論文印刷物の山が届いていたこと、小島昌治と同じ宿に泊まっていたことなどが書かれている。また、会場である Europahaus については、次のような感想が書かれている³⁸⁾；

会場は商店の背中にくっついており、楽隊が歓迎している。いきなりお嬢さんからおみやげをもらい、レジストレーションをし、[読み取り不能]しく厚い文献をもらい、短波のレーザーをもらう。さすがに国際会議をしじゅうやるところらしく、イヤホーンで4つの国際法で即座にほん訳が行われる。音は明瞭で、お陰で始めて英語がわかったような気がする。

上記の記述を見るに、どうやらザルツブルクでは IAEA 主催の国際会議開催に際して、かなり大規模な準備をしていたようである。さらに続けて、4日の午後の Session 終了後に日本人研究者と会食した状況について記されている³⁸⁾；

知らない日本人がいる。午後のセッションが終わったのは2時すぎで、それから日本人だけで安い食堂(野天)に行く。その時の顔ぶれは、石井(電試、東京の、10月中旬からのワシントンの真空の会へ出席するという)、岩だて(芝浦?非常に活発な老人で、映画ばかりとっている)、小島、小沢(これは仲々おもしろい人物)、木原、和田。他に関口さんがいたが外人をつれだって行った。

冒頭にある伏見の知らない日本人というのは、この時期には核融合研究に直接的にかかわっていない石井博と岩竹松之介のことであつたと思われる。石井(当時、電気試験所材料部真空技術研究室主任)は電試における核融合研究班の真空部門で、特に超高真空装置を担当しており、第1回 IAEA 会議でも真空部門に参加した³⁹⁾。なお、9名の日本人出席者のなかで唯一、矢崎為一の名はこの時点では出てこない。伏見が矢崎と会ったのは翌日の9月5日の会議場であつた³⁸⁾；

驚いたことには、矢崎為一さんが現れて、外人のみ[本稿筆者注：原文ママ。間の意か]を泳いでいることである。おめつけ役のような気もするが、親切に色々みんなのめんどろを見てくれる。・・・(中略)・・・木原さんは J.B.Taylor のランジュバン理論に対してコメント。日本人が誰も壇上に出ないのはいけないということらしい、矢崎氏がたきつけた点もある。

この後も、何度か矢崎の名が伏見の日記に出てくる。日記によると、矢崎は伏見に諸外国の研究者を引き合せたり、一緒に食事に行った際に外国人研究者から実情を聞き出したりするなどしていたという。矢崎も岩竹らと同様、直接的に核融合研究に従事していたわけではなかったようだが、会議に出席した日本人が発言する機会を得るように尽力し、伏見の言うように“お目付け役”を見事にこなしていたことがうかがえる⁴⁰⁾。伏見がザルツブルクを離れる際に、わざわざ礼を言いに行ったところを見ても、矢崎がそれなりの役割を務めたこと

が分かる。伏見の日記にはさらにグラッド H.Grad やローゼンブルースとの接見(9月5日)³⁸⁾、日本放送協会(NHK)の要請を受け、木原太郎との対談を撮影したこと(9月7日)等³⁸⁾、当時会議に出席した人間でなければ分からない事柄が数多く見受けられた。

2.2 海外研究者が記した第1回 IAEA 会議の報告

核融合研究に特化した初の国際会議である第1回 IAEA 会議の会議報告論文は、出席した研究者によって海外の学術誌にも数件が掲載されたほか、米国 UCRL(LRL)の Trip Report として取り纏められたりもしている⁴¹⁾。以下では、米国、英国、ソ連の研究者が記した報告内容を各国別に見ていくことにする。

2.2.1 米国研究者の会議報告論文

米国カリフォルニア大学のローレンス放射線研究所(Lawrence Radiation Laboratory : LRL)に所属する研究者は、第5回電離気体現象国際会議と第1回 IAEA 会議に出席した記録を1961年10月に Trip Report として纏めている。ここでは、第1回 IAEA 会議に関する報告内容を取り上げる。

ポスト R.F.Post はミラー装置に関する各国の発表について私見を述べている⁴²⁾。彼は、先ずソ連 Ogra について、装置稼働の中で生じる“Cooperative processes(協同過程)”の奇妙な性質に興味深いと評した。Ogra では150mAの電流を注入することで、1cm³あたり約10⁷個のイオンという密度制限が起こり、プラズマの角度方向の非対称性と回転がプラズマポテンシャルの発生に付随して観測された。なお、装置の端での追加ポテンシャルによる効果によって、プラズマは部分的に安定化され、また対称となり、異常な高エネルギー粒子の損失割合を減少させるはずであったが、実験結果ではプラズマは不規則な状態であったという。また、ポストは特に Ogra の放射計で観測された100eVという値に関して、「かなり穏当な電子温度を示したようには確信できない」⁴³⁾とし、異常損失や回転効果などをその原因として挙げた。しかし、Ogra の実験が協同現象に関するとても有益な説明を与えた点について、ポストは一定の評価を下している。そして、単純な構造のミラー装置においても安定性を検証する必要性を強調した。一方、ヨッフエの実験に関して、ポストは「注目に値する興味」と評した。その上で、Ioffe-bar については「プリンストンの安定化させる巻線に良く似た」ものと表現し、観測された減衰時間で顕著な増加が見られたことに触れている⁴⁴⁾。しかし、完全に言及されていない点として、ポストは装置内で磁場の勾配がプラズマから外側に向かっていたところで増加するための安定化電流システムを造ることが重要であるとヨッフエが信じていることを挙げた。そして、「これは直観的に魅力的なものであるように思えるけれども、磁場がシアを持つという単純な条件以上のものである。しかしながら、このことの必要性を論じた理論研究は提出されなかった」⁴⁴⁾として、今後の理論的検証を求めた。このほか、第1回 IAEA 会議でのミラー装置の発表を総括して、安定化させた磁場をとまなう、もしくはともなわない低ベータミラー装置に関心が向けられ、いくつかの注目すべきギャップが見受けられたとしている。そして、ソ連のミラー装置はイオンマグネトロンもしく

は粒子入射によるプラズマ生成の方法に限界を認めながらも、必然的に極低密度の計画に限定して実験を行っており、ポスト自身が所属する LRL でのミラー装置の実験に直接の成功の兆しを与えることは出来ないと述べた。その一方、シラ(Scylla)のような速い圧縮実験も逆転させた磁場を特徴として持つために、「直接的な興味の大部分を我々に示さなかった」としている⁴⁵⁾。そして、結論として LRL 実験と比較できる実験は提示されず、同時にミラー装置もしくは修正されたミラー装置で中間ベータ値のプラズマ(1-10%)における長時間のプラズマ閉じ込めへの重大な興味や問題を生むようなものもなかったと結論した。その一方で、ヨーロッパ諸国では LRL 程度の実験装置を計画している点に触れ、併せてプラズマ生成の方法が確立出来ない実験は最終的なものとは見なせないと評している。

ファース H.P.Furth もミラー装置での不安定性に関して、特に Ioffe-bar について言及している⁴⁶⁾。彼は「とても重要であるのに、余り注目を向けられていなかった技術的なポイント」として、ミラー装置に関する安定性へのアルティモービッチの非難を挙げている。アルティモービッチがミラー装置での交換型不安定性の安定化に対する評価に「望みを無くした」とした際に、ヨッフエの実験をミラー装置と捉えなかったことをファースは納得していない。つまり、アルティモービッチが Ioffe-bar を「混合型磁場による磁気トラップ」と表現して、ミラー磁場と区別したことに言及し、彼は低ベータ・ミラー磁場でも「とても実質的な安定化させるための磁場が必要である」⁴⁶⁾とロシア人研究者が感じていることを指摘した。そして、低ベータ値ではなく、Ioffe-bar に起因するシアからの安定化効果によってミラー磁場が安定化されたのであれば、アルティモービッチの発言もいくぶん正当なものになるとする反面、ロシア人がこの効果についての理論を提案せず、間接的に仄めかしたただけであったことに驚嘆したとしている。このほか、ラウア E.J.Lauer⁴⁷⁾もソ連のミラー装置 Ogra の実験とリヴァモアのミラー実験を比較して、LRL の実験の方が同程度の装置パラメータで、良い閉じ込め時間を示していることに言及している。このように、LRL の多くの研究者はソ連のミラー装置研究に大変関心を寄せており、LRL のミラー装置が Ogra などの装置と比較して、優れていることを強調していた⁴⁷⁾。

他方、クンケル W.B.Kunkel⁴⁸⁾はレーネルトが発表した回転プラズマの研究を取り上げ、伏見の報告にもあるレーネルトの発表の問題点に触れている。そして、後にレーネルトによる“confinement”という言葉の誤用が原因であることが明らかになったと述べている。また、非公開討論会“Enhanced diffusion across a magnetic field”での、カドムツェフによる不安定性の分析結果が触れられているが、報告ではカドムツェフが主張する磁場中の“positive column”の原因については結論が出されなかったとある。彼の報告によると、討論会では多数の研究者によって様々な議論がなされたが、それぞれの発言者は単に実際に見たもしくは聞いた現象、または彼らが理解している問題について説明しているだけであったようである。そのため、クンケルは「プラズマの乱れや増加した拡散機構の原因の問題は、再び向上することではなく、全体のセッションで問題の見識を得ることが出来るという希望を持っていた物理学者は、たぶん失望しただろう」と総括している⁴⁸⁾。

上述したものの以外にも、LRL の会議報告論文ではコルゲート S.A.Colgate が第 1 回 IAEA 会議で発表された特に米国、仏国、ソ連のハードコアピンチに関する研究⁴⁹⁾を、ニューカム W.A.Newcomb が「ミラー装置とテータピンチ装置の安定性」、「ハードコアピンチの不安定性」、「ステラレータのポンプアウト」に関する米・ソ研究者による理論研究について総括をしている⁵⁰⁾。なお、ニューカムはローゼンブルースらが発表した有限ラーマー半径の安定化効果をミラーおよびテータピンチの安定化を説明するものとして挙げてはいるが、実験結果を本当に説明できるかは明らかになっていないと述べている。

2.2.2 英国研究者の会議報告論文

英国研究者の報告論文には、ジェフコット D.F.Jephcott(A.E.R.E.,Harwell)⁵¹⁾とスイートマン D.R.Sweetman(Atomic Weapons Research Establishment)⁵²⁾によって書かれたものが存在する。

ジェフコットは会議のトピックスとして、カスプ磁場とミラー磁場、さらに会議の総括講演を挙げている。第 2 回ジュネーブ会議で数件の理論研究が報告されただけであったカスプ磁場は、第 1 回 IAEA 会議においては各国での実験結果も発表された。ジェフコットは、カスプ磁場配位を「理論的に最も安定したプラズマ閉じ込め系をつくる」ことが出来るものと称し、同じ英国ハーウェル(Harwell)研究所のアレン T.K.Allen らによるカスプ磁場装置でのプラズマ圧縮の実験報告に加えて、米国ハガーマン D.C.Hagerman らの静カスプ磁場中へのイオンビームの入射実験、さらにソ連のコバルスキー N.G.Kivalski らの“Orekh”と称されたカスプ磁場中でのイオンプラズマの振る舞いに関する発表を取り上げている。その上で、彼はそれぞれの実験発表でのイオン数密度 n とプラズマ閉じ込め時間 τ の積を導出した。その結果、 $n\tau$ はハーウェル研究所の装置で $10^{11}\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 、米国の装置で最小値が $10^8\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ 、ソ連の装置で約 $10^9 \sim 10^{10}\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ となり、熱核融合炉に必要とされる $10^{14} \sim 10^{15}\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ には達していなかった。この原因として、プラズマ入射実験は高エネルギーイオンの持つ反面、高密度化が難しい。その一方で、圧縮実験は高密度のイオンを達成できるが、イオン温度が低いという問題があった。以上の結果から、ジェフコットはこれらの実験は初期段階にあり、熱核融合炉の設計を導くかもしれない装置としての価値を見積もるには未だ早いと評した。他方、ミラー装置に関して、ジェフコットは米国 UCRL とソ連の Ogra の比較に言及したあと、「著しい興味ある新しい結果」として、交換型不安定性を安定化したヨッフエの実験を挙げている。彼の報告では、ヨッフエの発表内容は詳細に記載され、プラズマ閉じ込め時間が Ioffe-bar の付加によって、約 $100\mu\text{s}$ から約 $500\mu\text{s}$ にまで増加し、交換型不安定性の抑制に効果があることを実験的証拠として示したと述べている。これらの記述の後、ジェフコットは「熱核融合炉が現実になる前に打ち勝たなければならない最も明白な問題は、プラズマ閉じ込めの不安定性についての問題である」とし、「絶えず新しい不安定性は発見されているが、少なくともプラズマが例外なく不安定であるということや、小規模の不安定性は勿論我慢できるかもしれないということは認められなかった」と述べている。そして、アルティモービッチの総括講演の「煉獄」の部分を引用して、彼は報告を締め括っている。なお、会議で発表されたトーラス装置などに関する記述は、ジェフコットの報告には見

られなかった。

これに対して、スイートマンの報告では、ジェフコットと異なった観点で第1回 IAEA 会議の成果が論じられている。スイートマンは同会議の発表内容から導き出される結論として、「非公式討論会やコーヒールームでの議論でさえ、一つの実験が他の実験と比較検討され、一般的描像を明らかにする」ことに力が向けられた結果、多くの知識が提供されることになったと述べている。なお、彼の判断では「研究方法は3年前の第2回ジュネーブ会議以来、かなり変わった」という。スイートマン曰く、「手早く行えた粗雑な実験の日々は過ぎ去り、かなり限定された配位の中での注意深い実験の期間に落ち着いていることが明らか」であり、ゆっくりとしたピンチ装置から、ミラー配位やテータピンチ実験へと「重要視の一定の推移」があったと位置づけた。なお、スイートマンも米国とソ連のミラー装置での差異や Ioffe-bar の実験について、その議論や成果に触れているが、決定的な実験が通常の安定なミラー配位で行われていないと述べて、あまり詳細には論じていない。むしろ、彼は米国海軍研究所のコルブ A.C.Kolb らが提案した長いコイルを備えた 2MJ テータピンチ実験で、15 μ s 程度のあいだ、安定したプラズマを観測したことに注目していた。さらに、Stellarator-C が回転変換はともなわずに稼働し始めていることにも短く触れて、「初動実験の結果が有望なものであった」としている。そして、スイートマンもアルティモービッチの言葉「我々が煉獄を通り抜けることなしに天国には行けない」を引用し、最終的なゴールに達するには程遠いにも関わらず、難しさがどこにあるか、それが基礎的な障壁であることをはっきりと理解していると取り纏めた。

2.2.3 ソ連研究者の会議報告論文

ソ連の研究者による第1回 IAEA 会議に関する会議報告論文としては、クズネツォフ E.I.Kuznetsev とベリホフ E.P.Velihov が記し、1962年に学術誌『アトムナヤエネルギー』(*Atomnaya Energiya*)に掲載された論文を取り上げる⁵³⁾。同報告論文では、会議の発表が I.実験的研究と II.理論的研究に大別され、実験的研究はさらに「速い過程(fast process)」、「トロイダルチェンバーの準定常放電」、「加熱及び保持の高周波法」、「磁気ビン」の四小節に分けて記述されている。

実験的研究について、クズネツォフとベリホフは会議内容全体が示しているように、「問題の状態は1958年の第2回ジュネーブ会議に示された水準と比較すると、非常に大きな進歩があった」としている。そして、1958年の段階は実験装置に関する新しい着想が議論されたのに対して、第1回 IAEA 会議では「ほとんど全ての研究分野で、新しい実験的結果が提示された」と評した。

クズネツォフらの報告において、実験的研究の最初に取り上げているのは、テータピンチ装置での速いピンチ過程であった。彼らの見解では、もともと行われていた直線ピンチ実験でも100万度以上の高温を得ていたが、不安定性のために研究の見通しが悪いことが明らかになり、その結果として研究者の関心がテータピンチへと移ったという。同時期にはソ連の研究者もテータピンチ研究に関心を持っていたようで、米国コルブの実験結果はクズネ

ツォフらの報告でも取り上げられていた。また、テーダピンチの安定性についてはたくさん
の研究結果にも関わらず、十分に明らかにはなっていないが、その反面、「理論的実験的研
究は、このような配位が強い不安定性を示すかどうか考える根拠を与えない」と述べている。

「トロイダルチェンバーの準定常放電」に関しては、「会議で報告された最も興味ある仕
事」として、英国の装置 ZETA での「電子の温度と密度の動きの時間的測定の仕事(0.1mm
から 2mm までの波長領域でプラズマから放射するスペクトル研究)」を挙げている。また、
会期中に「一般的な関心が起こった」のは、ソ連の Alpha における中性粒子のエネルギー分
布の測定であったと述べている。また ZETA と Alpha の結果の比較を行い、Alpha ではエネ
ルギーが質量だけでなく、イオン電荷の平方に依存する結果が出たが、ZETA ではイオンの
エネルギーが質量には依存する反面、電荷には依存しない結果が示された点を指摘してい
た。一方、強い安定化磁場を用いるトロイダル放電の研究として、ソ連のトカマクと米国の
ステラレータの実験結果も取り上げられている。その中では、新設された Stellarator-C の予
備実験の結果も触れられ、ヘリカル磁場なしでプラズマ保持時間が 1ms になったことも記
されている。これに対して、他の会議報告論文には一切記載がないソ連のトカマク T-2 の実
験結果もクズネツォフらは言及していた。T-2 の実験では、 10^{-6} mmHg で 400°Cにまでチェン
バーを加熱し、1 分間に 6 回予備放電を行なっている。その結果、放電の電流カーブには 2
つの極大があらわれ、プラズマ温度は 15eV から 30-40eV まで増加したという。また、電流
の二つ目の極大点が示された時間に、放電軸の部分に直径 7cm の「核」がつくられている
ことが発見されたとある。この「核」の形成は明らかに「プラズマ周辺から磁場を横切る粒
子の異常に速い流失によって条件づけられている」ようで、クズネツォフとベリホフは、粒
子の異常な拡散の原因はカドムツェフによって論じられた「対流不安定性、Higher Mode の
MHD 不安定性、或いはその他の未知の機構によるもの」と推察している。

他方、クズネツォフらによると、第 1 回 IAEA 会議ではプラズマ加熱の手法として「イオ
ン・サイクロトロン波を用いようとする研究所の数が増加した」という。しかし、全ての実
験で、「投入したエネルギーの量に無関係にイオンの温度は 10eV のオーダーを示していて、
まだよく分っていないメカニズムによるエネルギーの強い発散の存在が検証された」よう
である。これに対して、プラズマの保持と安定化のために高周波磁場を使った研究発表は
「他の方向にそって提出された報告にくらべて控えめであるが、大きな報告を引き起こし
た」と指摘している。具体的にはオランダのバン・デル・ラーン P.C.T.Van der Laan 及びリ
チエンス L.H.Th.Rietjens によるトロイダル放電の安定化に関する実験や、イギリスのトー
ネマン P.C.Thonemann による回転高調波磁場を用いたプラズマ保持効果の研究、プラズマと
共鳴器の高周波電磁場との相互作用を発表したフランスのコンソル T.Consoli 及びソ連のグ
ラゴレーフ V.M.Glagolev、進行波によるプラズマの保持に対するシステムを発表したソ連の
アンドレーフ V.A.Andreev やデミルハノフ R.D. Demirkhanov の発表を挙げている。

当時最も広く発展した「磁気ビン」でのプラズマ閉じ込め研究は、クズネツォフとベリホ
フの報告においても、ミラー配位やカスプ配位などの磁場閉じ込め装置の結果が Ogra や

DCX-1 など装置ごとに列挙されている。その中には、ヨッフエによる実験結果も含まれており、交換型不安定性を抑止するために付加された Ioffe-bar の効果にも触れている。しかし、会議最終日に post deadline paper として発表されたことを踏まえて、ヨッフエらの実験結果について、クズネツォフとベリホフは慎重な見解を示しており、「このような結合磁場が磁気栓をもつ系に対して最も危険な交換型不安定性との戦いの有効な手段であるかを確認しなければならない」と評した。なお、米国ポストによる「時間的に増大する磁場を持つ磁気ビン(ミラー磁場装置)」の研究については、交換型不安定性が発見されなかったが、プラズマの安定化機構の研究はなされておらず、クズネツォフらはこれらの実験も「更に検証する必要がある」としている。一方、英国アレンらによるカスプ磁場中で衝撃波によりプラズマを圧縮する実験に関しては、「実験データが未だ予備的な性格を持っているため、現在の単純化された理論との比較には不十分である」と述べている。

次に、クズネツォフとベリホフの会議報告論文における第1回 IAEA 会議で発表された理論研究に関する記述を見ていく。彼らによると、会議で提出された主な理論的仕事は、「プラズマの完全な運動学的理論の基礎とその構成」および「現在の理論の2つの基本的な問題—プラズマの安定性とプラズマの不安定性の力学」に捧げられたという。また、理論の一般的な問題に捧げられた仕事のうちで、注目しなければならない研究として、「粒子と波動の相互作用を考慮したプラズマの運動学的理論」や「空間的に一様でないプラズマの運動学理論」、「磁気流体力学における Lagrange 及び Hamilton の方法の応用」が挙げられている。

なお、プラズマの安定性に関する問題は「理論の中心的問題の一つ」で、特に有限なラーマー半径を持つプラズマの安定性が問題となったことが指摘された。そのなかでも、ローゼンブルース、クラール N.A.Krall, ロストカー N.Rostoker らが発表したプラズマの弱い不安定性に対するラーマー半径の有限量の影響については、カドムツェフやロングマイヤー C.L.Longmire とローゼンブルースがそれまでに発表している安定性に関する磁気流体力学理論との関係も踏まえて、発表内容が詳細に記されている。その一方、レーネルトが発表した磁気流体的近似の問題は、クズネツォフとベリホフの見解として「十分に厳密ではない」と批判されていた。

このほか、巨視的不安定性と微視的不安定性の安定化問題について、多くの発表が引用されているが、異常拡散に関するカドムツェフの提案は大きな関心が寄せられたという。カドムツェフの理論によれば、強磁場を持つトロイダル装置であるステラレータとトカマクの異常損失の源は、ジュール加熱の状態においては「電流的対流的不安定性」であるとされた。しかし、クズネツォフとベリホフは「今日の理論は実験との詳しい比較のためには不十分である」と述べ、特に不十分な点として「ステラレータで得られた異常拡散の係数」と「電子のドリフト速度の一定な臨界値」を挙げている。また、カドムツェフが指摘する「電流的対流的不安定性」のほかにも異常拡散を起す原因があるとし、この問題は未だ解決していないことを強調していた。

他方、ヨッフエによる Ioffe-bar の実験の結果も踏まえて、クズネツォフとベリホフは第1

回 IAEA 会議において実験的にも理論的にも証明されたのは、「磁気流体力学的に安定な系をつくる一連の可能性があること」であったが、それでも粒子の非マクスウェル分布によって引き起こされる微視的不安定性の発展の可能性のあることを指摘した。その一方で、彼らは理論の観点から、「今日どのような系が制御された熱核融合反応を実現するかを理論的に予言することは不可能である」としている。しかし、「弱い磁場を持つ系の磁気流体的不安定性」や「簡単な栓を持つ配位不安定性」、「周囲に向かって増大する場によるこの不安定性の安定化の可能性」、「プラズマ加熱のためのビームによる不安定性の利用の可能性」等については一定の結論が提出され、過去の会議が示すように、このような結論のうちの多くが実験で確認されたと述べている。そして、ローゼンブルースが指摘したように「今日の理論は制御核融合のまっすぐな道を示しえないけれども、その実現の不可能性を証明しようとする理論家の長い努力も成功しなかった」と総括した。さらに、最後にアルティモービッチの総括講演を取り上げ、「20 世紀の科学の成功で生じた全ての他の科学技術の問題と比べて、熱核融合の問題は例外的に困難である。それにもかかわらず、結局において制御核融合の問題が解かれるということは疑いがない」と述べ、具体的には「最も危険な磁気流体的不安定性の除去の研究が成功することが求められる」として会議報告論文を締めくくっていた。

2.3 会議報告論文の比較

以上、これまでの調査で発見できた第 1 回 IAEA 会議に関する会議報告論文の内容を日本と諸外国の研究者に分けて概略を列挙したが、ここでは幾つかの項目について、内容の比較を行う。

2.3.1 ミラー磁場とテータピンチ実験

ミラー装置に関して各国の会議報告論文を比較すると、日本・英国・ソ連の研究者がポストら LRL の多段圧縮ミラー実験で交換型不安定性を観測せずにプラズマを閉じ込めた結果に触れている。ただ、英国とソ連の報告での記述は LRL とソ連 Ogra の実験を比較し、さらなる検証の必要性を述べている。これに対して、関口の報告では「磁気ミラー型でも不安定性が起るとの議論が盛んに行なわれたが、実験的にはまだ必ずしも明確ではない」と述べるだけで、英・ソほど詳細な分析は行われていない。一方、ポストやファースら LRL の当事者は、Ogra の実験結果やアルティモービッチの総括講演のようなミラー装置の不安定性についての問題や批判を取り上げてはいるが、LRL の実験に有益な情報を与えるものではないと論じ、自分たちの実験にかなりの自信を見せていた。Ogra の実験が協同現象に関する有益な説明を与えた点について評価している点も、ポストの中で自身が先導する LRL のミラー装置にかなりの自信があったことの裏返しであるような印象を受ける。

これに対して、テータピンチ実験に関しては米国 LRL の報告には唯一 Scylla に関する記述があるのみで、同型の装置にあまり関心がなかったことがうかがえる。他方、日本・英国・ソ連の報告では、テータピンチの研究成果について比較的詳細な記載がある。日本の関口はテータピンチの実験結果を会議後に発表されたものも含めてかなりの内容を記載し、その

研究の進展に希望を述べている。英国のジェフコットも英国や米国、ソ連の実験発表を取り上げて、さらに $n\tau$ 値の比較も行うことで現状の把握に努めている。しかし、ジェフコットはテータピンチ研究が初期段階にあるために、核融合炉に繋がるかを評価するのは未だ早いと評している。スイートマンもテータピンチ研究、特に米国海軍研究所の実験について言及し、その結果に注目している。ソ連のクズネツォフとベリホフの報告においても、スイートマンと同様に、米国海軍研究所の実験結果が挙げられている。しかし、ジェフコットと同様に、ソ連の研究者もテータピンチの安定性に関しては、十分に明らかにされていないと論じた。

ミラーおよびテータピンチ装置の実験結果について、日本人研究者(今回の場合は関口)と諸外国の研究者の報告を比較すると、注目している発表に関しては、ほぼ一致していた。しかし、諸外国の研究者は実験データに詳細な分析を加えている場合が多く、未だ装置としての結論を出す段階ではないとしているのに対して、関口の場合はそこまでの分析は行っていない。なお、小島の報告でも、ミラー装置やテータピンチ装置で使用された測定方法には言及しているが、それ以上の記述は彼の報告に見られない。このような違いは、会議で得られた情報量に依存していると考えられ、後述する Ioffe-bar の内容も含めて、日本人研究者が国際会議での情報収集、さらに収集したデータの分析が困難であったことの表れであるといえる。

2.3.2 ヨッフエによる min.B(Ioffe-bar)の報告

第1回 IAEA 会議においてエポックな報告となったヨッフエによる最小磁場配位に関する発表に対する反応について、日本人出席者(伏見、関口、小島、木原)の報告を見てみると、どの報告にも Ioffe-bar の内容を確認することができなかった。唯一、ヨッフエの名を出しているのは伏見の日記で、その記述もヨッフエとユシマノフ E.E.Yushmanov らのミラー型装置に関する発表⁵⁴⁾に対して、米国側から「miss-understanding がある」との見解が出されたという記述だけであった³⁸⁾。米国 LRL の報告では、ポストとファースがヨッフエやアルティモービッチの名を挙げて、複合ミラー型に対する私見を述べており、強い関心を向けていたことが見て取れる。その一方で、アルティモービッチが提示した「ミラー装置への見解」と Ioffe-bar をミラー装置とは異なるような表現をした点に関して、特にファースは LRL の実験に対する脅威として受け止めた印象がうかがえる。英国の報告論文では、ジェフコットが「著しい興味ある新しい結果」として、交換型不安定性を安定化するヨッフエの実験を挙げている。しかし、その一方でスイートマンは Ioffe-bar の発表については触れているものの、テータピンチの実験ほどは高く評価していない。ソ連のクズネツォフとベリホフもヨッフエの発表に関して、同様の研究をさらに進めて、このような複合磁場が交換型不安定性との戦いの有効な手段であるかどうか確認しなければならないと述べている。

会議のプロシーディングスを確認すると、ヨッフエによる Ioffe-bar の発表は前述したとおり、post deadline paper として取り扱われている。そのため、発表要旨や本論文は会議に提出されず、プロシーディングスにはヨッフエが会場で行った講演を録音したものを文書化

したものが掲載されることになった。ヨッフエは会議 2 日目に行ったユシマノフらとのミラー磁場に関する共著報告の続きとして、改良を加えたミラー磁場(Ioffe-bar)についてその形式の説明と実験結果を発表した。この後、アルティモービッチが同日の総括講演でクルチャトフ研究所における複合ミラー型装置の研究について触れ、その形式の有効性を述べたということになる。もちろん、post deadline paper も会議における公式な発表だが、ファースの報告論文からも分かるように、少なくとも米国側はその発表が公式なものとは捉えていなかったようである。

以上から、米国・英国・ソ連の研究者は同会議でのヨッフエの報告は post deadline paper として発表が行われたために、提示された結果には疑問が残るが、今後の研究の進展には期待を込めていた。日本人の会議報告論文のなかに記載がなかった理由としては、日本からの公式出席者の数が少なかったことも然ることながら、報告が post deadline paper であったために、事前に内容が分からなかった点が影響していたと考えられる。しかし、会議後の 1962 年 5 月には、『核融合研究』に吉村久光が翻訳したアルティモービッチの総括講演が掲載され、そこには Ioffe-bar の図が提示されていた。ところが、それでも日本人がその重要性を認識するには時間を有することになる。

2.3.3 ステラレータとトカマク

「異常拡散」と称された現象によってプラズマ閉じ込めが制限されていたステラレータの成果は、第 1 回 IAEA 会議の時期は未だスポットが当たっていなかったと解釈できる。しかし、だからと言って、会議報告論文に記述が全く見られないわけでもない。

日本人研究者の報告にも、例えば関口の報告において、有望と評価された Stellarator-C の予備実験の記述があり、英国スイートマンやソ連クズネツォフとベリホフの報告にも同様の記載がある。これに対して、米国の報告では、ニューカムがステラレータでのボーム拡散公式にしたがう粒子損失(pump-out)を説明する理論研究が会議のトピックスになっていたことを挙げているのみで、ミラー装置を中心とする研究方針が LRL の報告内容に影響していたことがうかがえる。同じことが英国研究者の報告にも見られ、今回調査した会議報告論文全体を通して、ステラレータ型の装置にはそこまでの関心が払われていなかった。

その一方、ソ連のトカマクに関して、トカマク T-2 の実験結果が触れられていたのは、クズネツォフとベリホフの報告のみであった。報告では異常拡散に悩まされたトカマクの結果に対するカドムツェフが述べた見解も併記され、ソ連クルチャトフ研究所が一丸となって問題に取り組んでいる様子を伝えている。なお、ソ連の報告以外で、唯一トカマクのことを記述したのは関口の報告であったが、先述の通りにトカマクとステラレータの違いを認識できていなかったのが実情であった。

2.3.4 アルティモービッチの「煉獄」発言と制御核融合研究への今後の見通し

アルティモービッチの総括講演にある「我々は煉獄の中にいる」発言は、核融合研究開発の歴史を振り返る際には、必ずといって良いほど引用されている。当時の研究の困難さを示す言葉である「煉獄」発言は、会議報告論文に関連する記載があっても良いはずである。し

かし、今回調査できた各国の会議報告論文で「煉獄」発言を取り上げていたのは、英国の報告のみであった。

もちろん、アルティモービッチとローゼンブルースの総括講演は、第1回 IAEA 会議の内容を端的に示したものとして、いくつかの会議報告論文で引用されている。例えば、関口、木原、伏見の報告では、第2回ジュネーブ会議からの3年間には何も本質的に新しいことは出なかったという部分をアルティモービッチとローゼンブルースの発言から取り上げている。他方、米国の報告では、上述したアルティモービッチのミラー装置に関するコメントのみがファースによって引き合いに出されており、ソ連の報告でも「20世紀の科学の成功で生じた全ての他の科学技術の問題と比べて、熱核融合の問題は例外的に困難である」と、「それでも結局は、制御核融合の問題が解かれるということは疑いない」という箇所がアルティモービッチの講演から引用されている。しかし、これらの会議報告論文には「煉獄」という発言は引用されていなかった。

ただし、「煉獄」ということばを引用している英国の会議報告論文においても、決して制御核融合研究の将来に悲観的な見解を持っていたという訳ではなさそうである。たしかに、核融合炉の実現に向けて、研究の過程が容易なものではないということは明らかになったが、それでもプラズマの安定化が出来ないと証明された訳ではないため、今後も地道な研究が必要であるとする見解を研究者たちはアルティモービッチの「煉獄」発言の中に見出していたといえる。

なお、1982年に開催された第9回 IAEA 会議での Artsimovich Memorial Lecture の中で、伏見は当時の会議の印象としてアルティモービッチの「煉獄」発言が印象深かった事柄として取り上げている。しかし、日本人の会議報告論文に「煉獄」発言が全く記載されていなかったことを考えると、伏見の発言は後年から当時の状況を顧みたとの見解であって、1961年当時の研究者間での認識とは異なると思われる。ちなみに、ロシア人であるアルティモービッチがロシア正教会では認められていないカトリックの概念である“煉獄(Purgatory)”という言葉を使用したのかということとは分からない。伏見の講演では、この点に関して、研究者仲間に核融合の最終目標を達成することがいかに困難であるかを伝えるために使用したとある。そこには西欧諸国(つまりカトリック教徒)の研究者へ現実を理解させようとするためのアカデミシャン・アルティモービッチの計らいがあったのかもしれない。

アルティモービッチやローゼンブルースの総括講演とも関係ある事項であるが、核融合研究に対する今後の見通しについて、各国の会議報告論文から記述を比較すると、日本人研究者の報告がほぼ共通して「プラズマ物理学を中心とする基礎研究」への回帰を強調していたのに対して、米国・英国・ソ連の研究者は日本ほど基礎研究を重視するような言い回しを結論として述べておらず、現状の研究の延長がプラズマの安定化と制御核融合の実現に繋がるとしており、日本とは見解に若干の違いが見受けられた。

3. 内部導体系装置の隆盛：第2回 IAEA 会議(1965年)

1965年9月に英国カラム(Culham)研究所で開催された第2回 IAEA 会議では、ヨッフエの複合磁場の理論、最小磁場の安定化効果の各国での確認、トーラス装置による平均極小磁場の安定化効果の実験、ソ連トカマク装置の全貌公開等が、会議のトピックスとして挙げられる。特に、平均最小磁場の実験的立証は、従来のプラズマ閉じ込め実験においてきわめて短時間にプラズマが消滅してしまったという障害が始めて打破された結果でもあって、トーラス研究の隆盛に繋がる一つのきっかけになったといえる。以下に、第2回 IAEA 会議でのセッションと各国別の発表数を列挙する。

表2. 第2回 IAEA 会議における各国別口頭発表数(Proceedings に基づく)⁵⁵⁾

	Session I	Session II	Session III	Session IV	Session V	Session VI	Session VII	Session VIII	Session IX	国別合計
<i>U.S.A.</i>	2	3	6	5	4	4	4	2	4	34
<i>USSR</i>	3	0	3	5	5	3	2	8	5	34
<i>England</i>	2	2	1	0	1	1	1	2	0	10
<i>Japan</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
<i>France</i>	1	0	1	2	1	1	2	0	0	8
<i>Germany</i>	0	4	0	0	0	1	0	1	0	6
<i>Italy</i>	0	1	0	0	1	0	0	0	1	3
<i>Sweden</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
<i>Norway</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
<i>Netherlands</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Session別合計	8	11	12	12	12	11	10	13	12	101

SUMMARY SESSION

MAGNETIC WELLS (Session I)

THETA PINCHES (Session II)

INJECTION IN MIRROR GEOMETRY (Session III)

STABILITY AND DIFFUSION (Session IV)

PINCHES, DYNAMIC STABILIZATION (Session V)

PLASMA INSTABILITIES AND INTERACTIONS (Session VI)

FORMATION AND CONFINEMENT OF PLASMA FROM GUNS (Session VII)

CLOSED-LINE SYSTEMS (Session VIII)

PLASMA HEATING (Session IX)

宮本健郎の著書⁵⁶⁾から第2回 IAEA 会議の概要をピックアップすると、先ず、同会議のトピックスとして「最小磁場の MHD 安定化の効果が確認された」ことが挙げられている。

また、最小磁場の系はトーラス装置では実現できないが、代わりに平均最小磁場(average min.B)の考えがトーラス系に導入され、その中でも大河千弘らによる Toroidal multipole(多極磁場トーラス装置)の閉じ込め実験がプラズマをボーム時間よりかなり長い時間閉じ込めたことで、平均最小磁場の有効性を実証して注目を集めたと宮本は述べている。その一方、同じトーラス装置であるトカマク実験の全貌がアルティモービッチによって発表され、前回会議に引き続き、ZETA や Stellarator-C も実験結果が報告された。しかし、ZETA や Stellarator-C では閉じ込め時間がボーム時間程度で、損失機構について「苦渋に満ちた検討」がなされていたとある。他方、直線状テータピンチの実験は第 1 回 IAEA 会議の結果を受けて全盛をきわめ、「イオン温度は数 100eV から数 keV の高温、高密度のプラズマを生成できた」が、閉じ込め時間は端損失で決まるような実験結果が提示され、端損失のないトロイダル・テータピンチへの移行する転機になったようである。理論研究としては、MHD 不安定性に関しては理論と実験との対応が付き、その安定化への対策が立てられるようになったほか、プラズマの分布関数の非マクスウェル性による速度空間不安定性などの重要性が認識されることになった。そのため、スピッツァー L.Spitzer は総括講演にて、「多くの深刻な障害は、多数の科学者の何年かの努力によって克服されてきた。いまだ多くの障害が残ってはいるが、多くの国々の科学者の協力によって切り抜けられるだろうと期待できる十分な根拠がある」と締め括ったという。

前章でも述べたように、日本人研究者は第 1 回 IAEA 会議での反省を踏まえて、事前に組織した出席者一団が第 2 回 IAEA 会議で発表された各国の研究内容の正確な把握に努めている。そのため、彼らが帰国後に行った報告の内容は、諸外国の報告と比較しても引けを取らず、多岐の分野にわたっていた。なお、この結果は第 2 次将来計画小委員会やプラズマ研での研究計画再編に繋がることになる。本節では、日本国内での対応を踏まえて、前節(第 1 回 IAEA 会議)のような日本と諸外国の研究者の会議報告論文を全体的に取り扱う方法は用いず、第 2 回 IAEA 会議で発表された「内部導体系装置と Levitron(レビトロン)」、「Ioffe-bar」、「トカマクとステラレータ」、「テータピンチ」というトピックス単位で、各国の研究者が記した会議報告論文を比較する。

3.1 内部導体系装置と Levitron(レビトロン)

第 2 回 IAEA 会議で発表された内部導体系装置の実験結果は会期中から多くの注目を集めていた。このことは、会議に出席した日本人も勿論実感していたようで、さらに大河千弘の存在が実験の重要性を認識させるきっかけになったことは言うまでもない。

現に、伊藤博⁵⁷⁾や長尾重夫⁵⁸⁾、森茂⁵⁹⁾の報告では、大河による Toroidal Octopole のプラズマ閉じ込め実験について高評価が与えられている。特に、森は大河の発表について、「 $4 \times 10^{16} \text{eV} \cdot \text{cm}^3$ のプラズマを完全に保持したことを示し、本日のハイライトであった」、「大河(GA)の multi-pole の実験は仲間ぼめではなく本会議の金メダル」と絶賛した⁶⁰⁾。ただ、森は内部導体系を装置内で支える支持棒からのプラズマ損失が本質的問題であるという

見解も併記している。また、彼はトーラス装置の研究発表に対して、「GA の multipole を含めて、比較的うまく行っているせい、なかなか元気」という印象も持ったという⁶¹⁾。第2回 IAEA 会議が開催された頃、プラズマ中に導体があるという意味では、例えば米国 UCRL でファース H.P.Furth が内部導体を一本にした装置 Levitron(レビトロン)によるシア効果の検証実験⁶²⁾を、ドイツのマックス・プランク研究所ではグリーガー G.Griger やゲーリケ G.von Gierke を中心として、ステラレータ型装置である Wendelstein(ヴェンデルシュタイン)-I と閉じ込めを比較する意味で、大河と同じ Toroidal Octapole の実験が行われていた⁶³⁾。日本人の会議報告論文における上記2件の発表について見てみると、先ず、オーム加熱やマイクロ波加熱などプラズマの生成方法を変えて、シアの効果を確認した結果として、一定の安定化効果はあったものの、シアを増しても安定化効果が飽和したことを報告した Levitron での検証について、伊藤は「米国の Levitron もよい結果を出していた」⁶⁴⁾としていたのに対して、長尾は「Levitron の実験結果はどちらかといえば negative なものであるのに、自信満々で胸を張っている Dr.Furth に圧倒された嫌いがある」と述べており、見解の違いが出ている⁶⁵⁾。Levitron については、理論分野の情報収集を担当していた寺嶋由之介⁶⁶⁾もその実験結果に触れており、同装置では加熱方法の違いでシアの安定化効果に違いは出ていなかったことを特記している。他方、森は Levitron が近くシャットダウンするという話に触れて、「Levitron 位物理的成果(resistive instability, shear など)が出れば優秀」と評価している⁶⁷⁾。これに対して、ドイツのグリーガーらが発表した Toroidal Octapole によるセシウムプラズマの閉じ込め実験に関して、第2回 IAEA 会議で発表された内容についての直接的な言及は日本人出席者の報告には見られず、伊藤の報告にマックス・プランク研究所を見学した記録として、「小型のステラレータや Octapole などが目についた」ことが記載されているのみであった。伊藤はこれらの装置が意外に小さく、「我国にある各種トーラスよりむしろ小さいかも知れない」との印象を述べている⁶⁸⁾。また、「スカラレーター、Octapole などは米国の創案によるものであり、独創をもって鳴るドイツ研究者にしてはこのような模倣研究に甘んじている姿は意外であった」としている⁶⁸⁾。

その一方、上述したように第2回 IAEA 会議で Levitron の実験結果を発表した米国ファース⁶⁹⁾の報告では、内部導体系装置を“floating ring”と称していた。ただし、これは支持棒をともなう実験装置のことを指していて、Levitron とは区別化されている。ファースは、内部導体系装置を「いくぶん未開の型式」と表現している⁷⁰⁾。大河の実験結果に関しては、プラズマ入射後に不安定性を示さず、支持棒損失と一致する減衰時間をともなう、 $\sim 100\text{eV}$ のイオン温度と $\sim 10^{13}/\text{cm}^3$ の密度のプラズマを閉じ込めた結果を挙げている。これに続けて、セシウムプラズマを用いたマックス・プランク研究所の Octapole の実験でも、大河と良く似た安定化と閉じ込め結果を得たことにも触れている。さらに、彼はグリーガーが、通常のシア安定化をともなうステラレータ装置 Wendelstein-I において、古典的なプラズマ閉じ込めを実現したことを「さらに驚くこと」とし、Octapole と併記して評した。他方、自身が発表した Levitron については、オーミック加熱以外の加熱方法として、電子サイクロトロン加熱

を行ない、シア安定化の効果が加熱方法に依存していなかったという実験結果に言及していた。以上の結果を踏まえて、ファースは「平均極小磁場による安定化は西欧諸国によって裏付けられた」⁷¹⁾と評価し、大河やグリーガーの実験結果を認めながらも、閉端系における交換型不安定性の安定化に関しては、理論的に提案されている「シアと平均極小磁場の混合型」の実証には進んでいないとも述べて、現状はトラス装置における交換型不安定性の安定化検証が始まったばかりであることを認めている。

米国プリンストン大学でステラレータ計画を先導し、第2回 IAEA 会議の実験に関する総括講演を行ったスピッツァー L. Spitzer⁷²⁾も、平均極小磁場配位に関する実証を行った大河による Octopole 実験を会議報告論文中で高く評価した。低密度で高エネルギーなプラズマ閉じ込めを検証した大河の実験結果に対して、支持棒損失で閉じ込め時間が制約されていることを示した点を、スピッツァーは総括講演でも述べたように、「制御熱核融合計画の主要な一里塚になるだろう」⁷³⁾と称賛している。ドイツの研究成果については、ファースと同じように、「トロイダルセシウムプラズマ」として、Wendelstein-I と Octapole の実験結果を個別に取り扱わず、まとめて論じている。スピッツァーは「磁場に沿った電流の欠乏で静かになる(安定になる)であろうという希望」が一掃された中で、ドイツの実験は「食い違い、さらには希望がある結果」であったとしている。そして、「明らかにトロイダルプラズマが異常粒子損失をとまわずに閉じ込められる状況で、詳細に調査できることはとても関心がある」と評価した⁷⁴⁾。その一方で、Levitron の実験結果に関しては、ファースと同様に加熱方法の違いによる変化が見られなかった点に触れていた。

開催地でもあったカラム研究所のビッカートン R.J. Bickerton による報告⁷⁵⁾では、“Systems with Buried Conductors”として、内部導体系装置と Levitron に関する実験結果が一緒に取り纏められている。まず、ビッカートンは大河らによる Octopole 実験の成果を取り上げている。その際、彼は Octopole が擾乱をとまわずに水素プラズマを安定に閉じ込めたことと併せて、粒子の閉じ込め時間がボーム時間と同程度で、エネルギー閉じ込め時間としてはボーム時間の $\sim 1/5$ であった点に言及した。そして、この乏しいエネルギー閉じ込めは電荷交換と支持棒による粒子損失に起因すると分析している。一方、ドイツの Octapole は“Wendelstein-II”⁷⁶⁾と称され、Wendelstein-I によるセシウムプラズマの閉じ込めと同様に、ボーム時間の約 10 倍の結果を示し、それが 50G 程度の B_z 磁場によるシアの付加によって達成されたことが特記されていた。なお、ビッカートンは B_z 磁場の付加が「平衡もしくは安定のために必要かどうかの根拠は、はっきりしていない」としている。他方、Levitron に関しては、閉じ込め時間が発表内では与えられていなかったが、ベータ値

$$\beta = \frac{nk(T_e + T_i)}{B^2/8\pi}$$

や粒子密度、磁場中の揺動に注目して、シアの度合や j_{\parallel} の変化に依存している点が、理論と一致していたことが報告に記されていた。これらをもとに、ビッカートンは「唯一明らかな静かな水素プラズマが Octopole 内で、すなわち $j_{\parallel} = 0$ のシステムの中で生じたことは重要で

あるかもしれない」⁷⁷⁾と評し、またボーム拡散を超える閉じ込め時間を示したドイツのステラレータと Octapole によるセシウムプラズマ実験の結果は「イオン波の成長に関する質量効果に帰する」⁷⁷⁾ものと推察している。

全体を通して、諸外国の会議報告論文では大河の Octapole だけでなく、ドイツの Octapole によるセシウムプラズマにおける閉じ込め実験の成果についても、その発表内容に言及していた。たしかに、ドイツの報告の中心は Wendelstein-I、つまりはステラレータ装置でのセシウムプラズマ閉じ込めであったが、特に英国ビッカートンはボーム時間をを超える閉じ込め時間を達成した例として、高評価を与えていた。一方、日本人の報告では大河の成果を称賛することにとどまり、ドイツの成果を見逃していた感が見受けられる。しかし、どちらにしても、内部導体系装置が平均最小磁場による安定なプラズマ閉じ込めの実証を提示したことを、日本人研究者は諸外国の研究者と変わりなく認識することに成功したといえ、そこには大河の存在が強く影響を及ぼしていたといえる。

3.2 各国の Ioffe-bar 実験

前回第 1 回 IAEA 会議でインパクトを与えたソ連のヨッフエによる複合ミラー磁場での閉じ込め実験は、すぐに多くの国々で追試実験が始まった。一方、1963 年 9 月にパリで開催されたミラーの国際的研究会にて、ヨッフエは改めて Ioffe-bar の実験結果を発表したという⁷⁸⁾。しかし、同研究会は IAEA 会議と比べれば小規模なもので、会議内容についての詳細な記録は残されていない。そういった意味では、第 2 回 IAEA 会議が Ioffe-bar に関する各国の研究成果が報告され、その成果が広く認識されるきっかけになったといえる。

第 2 回 IAEA 会議において、ソ連の Ioffe-bar を付加したミラー装置 PR-5 の実験結果は、会議初日のトップバッターとして発表が行われた。各国の研究者がヨッフエの発表に傾聴していたようで、日本人出席者も同発表を詳細に記録している。PR-5 は従来の実験において、イオン温度 $T_i \cong 5 \text{ keV}$ 、プラズマ密度 $n \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマを 10ms のあいだ保持していたが、第 2 回 IAEA 会議での発表では、ヨッフエは密度の上昇に重点をおいて実験を行った結果を提示した。その結果、密度が 10^{11} cm^{-3} より低い場合には交換型不安定性は生じないが、 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ を超えると、急激な密度減少が見られた。また、この現象が 1963 年にミハイロフスキー A.B.Mikhailovsky とティモフェーエフ A.V.Timofeev が提示した理論に基づくイオンのドリフトサイクロトロン型不安定性と一致したことが報告された⁷⁹⁾。長尾の報告によれば、ヨッフエの発表は英語の同時通訳が聞き取りやすかったようで日本人出席者は安心したという。しかし、内容に関しては「期待の min.B は密度 10^{11} 個/c.c. どころでイオンサイクロトロン共鳴型の不安定性が起き、それが理論とよく合うというので、少々がっかり」と評している⁸⁰⁾。寺嶋もヨッフエの実験結果を述べ、ミハイロフスキー理論と併せて、密度上昇にともなう壁からの中性粒子放出での荷電交換が効いて、発生するドリフトサイクロトロン不安定性とは別に、一般的にプラズマの保持時間が短くなることや、プラズマの入射方法を変えることで密度減少が段階的に生じた点を会議報告論文に記載している⁸¹⁾。

また、伊藤はヨッフエを「若いけれど短軀でいかにも精力的な感じ」と称し、多くの研究者が関心を寄せていたと記している⁸²⁾。森もまた、ヨッフエの実験結果に関して、観測された不安定性は「イオンを貯めて高密度にして行く方式にとつて深刻」だが、「とにかく 10^{11}cm^{-3} 以下の密度での安定化効果は認められた」と評価した⁸³⁾。

これに加えて、例えばカラム研究所のフランシス G.Francis らの装置 M.T.S.E.⁸⁴⁾やフランスのフォントネー・オー・ローズ(Fontenay-Aux-Roses)研究所のターコン J.Tachon らによる装置 DECA-II⁸⁵⁾では、Ioffe-bar の付加にともなうミラー磁場+クアドルポール磁場による複合磁場での閉じ込め実験が発表された。森や寺嶋の報告には、上記2件の発表内容についても、比較的詳細な記録が取られており、長尾も実験内容に触れている。彼らの報告によれば、発表された両者の結果とも、付加磁場の効果によって閉じ込め時間は向上しているが、M.T.S.E.に関しては、高密度で min.B と単純ミラーの両方で $\tau=100\mu\text{s}$ と違いがなくなり、DECA-II は 10^{13-14}cm^{-3} で保持時間が通常約4倍にはなったが、マイクロ波などによる密度測定と荷電交換による高速中性粒子からの密度測定で、壁からの中性粒子の放出によって3桁の喰い違いが生じ、さらに減衰曲線にも不自然な曲がりがあったために、未だ min.B の効果が高密度まで安定化に有効と結論できないとされた。これらの実験を踏まえて、寺嶋は「荷電交換過程にマスクされている不安定性をあばき出すには、プラズマ入射の方法が決め手になりそうである」とし、「back ground の圧力を下げても壁にイオンが衝突して中性粒子を作るから、イオンの速度分布・空間分布を上手く作る必要がある」と評している⁸⁶⁾。森は min.B に関して、第2回 IAEA 会議で「再び低密度($\leq 10^{10}\text{cm}^{-3}$)での安定化効果は確認されたが、その後の目ざましい成果は出ていない」と分析し、その理由を「目ざましい成果を出すには、 $n \geq 10^{12}\text{cm}^{-3}$, $T_i \sim \text{keV}$, charge exchange mean life $\gg 10\text{ms}$ のプラズマを造る必要がある、これは現在実験的に非常にむづかしいからである」と述べた⁸⁷⁾。しかしその一方で、「このプラズマを造るための数多くの努力は論文にはならなくても正しく評価すべきである」と纏めている⁸⁷⁾。他方、伊藤は上記2件の発表内容には一切触れていないが、会議で発表された Ioffe-bar の実験を総じて、min.B の実験は会議の中心議題の一つであったけれども、「まだ充分な発展はみせていない」と評し、「Ioffe 場」が単に「カスプ場」と称されていたことにも触れて、「たいていの装置にとりつけられ多少とも効果があるということらしい」と分析している⁸²⁾。その一方で長尾は、min.B があっても「loss cone instability」があるために、ミラー装置は「核融合炉としてはどうも駄目らしい」とする説が、カドムツェフ B.B.Kadomtsev らによって提唱され、「ここ2~3年のうちにけりがつくから次の国際会議で mirror 型装置は止めをさされるかも知れない」ことを報告中に特記していた⁸⁰⁾。

米国 LRL のファースは、前回の会議報告論文でヨッフエの発表とアルティモービッチの総括講演に言及していたが、今回もその点に触れていた⁸⁸⁾。特に、第1回 IAEA 会議での「技術的に確定的ではないにもかかわらず、従来のミラー装置に対するアルティモービッチの批判」に関心があり、「最小磁場の技術によって交換型不安定性を除去したヨッフエの成功は、開放端系のさらなる基礎的不安定性をさがす道の上で、必要な初期段階として提示

された」と評した。その上で、第2回 IAEA 会議で発表されたヨッフエの発表に関しては、ポストとローゼンブルースが提唱したロスコーン不安定性に関連しているかもしれない「2つの新しいモードを報告した」ことに触れている。また、ファースはヨッフエが 5keV イオンを最小磁場系に満たした時に、異常に急激な密度減衰を発見し、さらに「異常損失が全て磁場に沿って生ずる」とした予備的指摘も併記している。このほか、カラムとフォントネー・オー・ローズ研究所での同様の実験にも言及しており、これらの実験が目立った不安定性現象を提示していない反面、「熱いイオン(高エネルギーイオン)がヨッフエの実験よりも多い背景中性気体による電荷交換によって損失していた」としている。さらに、最小磁場配位での PHOENIX (フェニックス), ALICE (アリス), Ogra-II(オグラ II)の実験に対して、もしプラズマが安定に閉じ込められるのであれば、「非常に管理できる安定な状態のプラズマを確立するので、格別の関心がある」と言及した。なお、クアドルポール配位による安定化を行っている PHOENIX は 10^9 イオン/cm³ に、一方の ALICE (オクトポール安定化)では 3×10^8 イオン/cm³ に達したが、両者とも不安定性によって閉じ込めが制限され、ALICE の場合には異常損失の存在も確認された。このような Ioffe-bar 実験を総括して、ファースは「最小磁場配位での中性粒子ビームの入射は、中間値的な密度でのミラー型装置の温度に対して有望である」という評価を述べている。

スピッツァーは私見として、「会議の主要な一里塚は、開放端系の磁気流体力学的安定に関する実験研究であった」、「プラズマを安定化させる最小磁場配位の成功は、プラズマ物理の理論や実験が満足する結果をもたらす新たな分野を運命づける」としている⁸⁹⁾。また、第2回 IAEA 会議での Ioffe-bar についての6件の発表が重要なトピックスを扱い、全ての実験で捕捉された粒子の密度や閉じ込め時間は多極磁場を付加した場合で著しく増加した点にも言及している。そして、これらの実験装置が異なる方法でプラズマを生成していることを指摘し、それらの間での定性的な一致は一般的結果が正しいという重要な確信を与えるものと称した。その上で、ミラー装置における微視的不安定性がプラズマ損失の原因が実験結果から暗示されていて、「ロスコーンに関連する二流体不安定性の理論研究は、様々な型のロスコーン不安定性がミラー装置中でのとても深刻な問題になるであろうと予言する」点を危惧している⁸⁹⁾。その一方、深刻になる不安定性が観測されていないことから、「もしかすると、次の数年以内に、プラズマ損失における非磁気流体力学的不安定性は理解され、制御できるようになるだろう」との見解を示した⁸⁹⁾。

英国フランス G.Francis の会議報告論文⁹⁰⁾では、Ioffe-bar の発表5件(PR-5, M.T.S.E, DECA II, リヴァモアの Table top 実験, V-4)を取り扱っている。第2回 IAEA 会議での開放端系の実験において、フランスは単純ミラー中で上手く記録された交換型不安定性が、磁気井戸の使用によって抑圧されたとしている。また、ほとんどの磁気井戸の実験で、プラズマは容器の壁との衝突によって増加する背景中性気体との電荷交換のために、滑らかに減少する。さらに、この過程は閉じ込め時間を制限し、 $n\tau$ 積は 2.5×10^8 を超えることはなかったとしている。その上で、フランスは「ヨッフエの実験は再び注目すべき特例であった」

と評価した。そして、ヨッフエの実験中で観測された不安定性は、サイクロトロンドリフト不安定性と速度空間(ロスコーン)不安定性と解釈され、現状では不可能であるが、他の実験でもこの時の解釈が正しいか確認できれば、密度勾配を緩やかにすることでサイクロトロンドリフト不安定性が、また臨界長より短いプラズマを含むフラックス管によってロスコーン不安定性が避けられる可能性を指摘した。

3.3 米国とソ連のトーラス装置研究：ステラレータとトカマク

トーラス装置に関する発表では、ステラレータとトカマクの発表が米国とソ連の英知のぶつかり合いになった。森の報告には、米ソ間での論争について「factor 5 の範囲で Bohm 拡散。もっともこの factor 5 で質問戦ははででした」とある⁹¹⁾。また、ドイツの Wendelstein-I については古典拡散に支配されており、「このくいちがいの理由は不明」としている⁹¹⁾。そして、第 1 回 IAEA 会議ではあまり良い評価をされていなかったトーラス装置が、第 2 回 IAEA 会議では「イオン温度 100eV, 保持時間 ms の程度のプラズマについて議論できるようになった」として、「これはこの会議の一つの成果である」と評した。なお、トーラス装置でのボーム拡散に関して、アルティモービッチが会議総括のセッションで、「ボームの理論は著者自身どうして出したか分からないようなものであり、我々はこれに満足はできない」、「次の会議までにはボーム拡散を抑えたい」と発言したことを踏まえて、森は「魅力があるかどうかは、量の問題なので(あるいは技術的問題なので)今の私には判断しかねる」との見解を述べている⁹²⁾。一方、伊藤はトーラスが所期の結果には到達してはいないが、「米ソともに同程度の水準に達し、ザルツブルク会議以後めざましい進歩をとげていた」ことを指摘した。その上で、米国 Stellarator-C は、吉川庄一が中心となってイオンサイクロトロン加熱の実験を行った結果として、「イオン温度が 1~2keV, 電子温度数十 eV, 保持時間がミリ秒の域に達した」のに対して、ソ連のトカマク(伊藤の報告では「トコマック」)も同程度の結果を示し、その後にボーム拡散についての食い違いにともなう活発な論戦があったと会議の様子を記している。伊藤によると、「ソ連の御大 Artsimovich は小柄ではあるが大そう議論が鋭く、ステラレータグループをせめて、Bishop 等は大西洋をへだてて真理がことなる筈はないなど苦しい答をしていた」という⁸²⁾。長尾や寺嶋の報告には、直接的にステラレータやトカマクの内容について記載はないものの、長尾は「翌日のまとめのときに聞いたところによると Bohm 先生自身が彼の理論をもうすっかり忘れてしまったということで、いかにこの現象が大変な代物であるか解るような気がする」と述べている⁹³⁾。なお、日本人の会議報告論文全体を通して、Wendelstein-I の成果は、森の記述を除いて明確な言及はなされていない。

次に、米国ファースの報告におけるステラレータとトカマクの記述を見てみる⁹⁴⁾。ファースは「ほとんどの閉端系配位の研究は低ベータ値であった」ことを指摘し、その上で巨大なシア安定化トーラスである米国プリンストン大学の Stellarator-C, ソ連クルチャトフ研究所のトカマク T-3, ソ連レビデフ研究所の L-1 で、全て異常拡散を観測したことに言及して

いる。その際、Stellarator-Cの結果は半経験則によるボーム拡散率と一致するのに対して、トカマクの結果は少なくとも10倍ゆっくりした損失を示すように見えるとした。この食い違いに対して、スピッツァーが主として測定技術と解釈の中での違いとする一方、アルティモビッチはトカマク中での強いシアが影響していると論じたという。その上で、ファースは結論として、シアによる安定化効果を利用するトーラス閉じ込めは「異常輸送に苦しめられている」が、ソ連のクルチャトフ研究所グループは「さらなるシアとさらなる高温だけが解決を与えると信じている」⁹⁴⁾との印象を述べている。

他方、ステラレータ計画の先導者であるスピッツァーは、会議報告論文⁹⁵⁾において「トロイダルプラズマは開放端配位よりも実験的に複雑である。そのために集中的には調査されてきていなかった」が、開放端系と違って端損失がないことが本質的に有利であるため、研究者の関心が高まっているとしている。トーラス装置の主要問題であるポンプアウト(異常損失)に関しては、スピッツァー曰く、第2回IAEA会議で発表された内容は「一貫した描像を与えていない」が、同性質が「一般的な特徴である点は判明した」という。その上で、トカマクT-3とStellarator-Cのような大型装置の結果とボーム拡散公式(理論値)を比較した際に、「大型トカマク装置において、報告された損失はこの理論値よりも約10倍(1桁)少ない。Stellarator-Cでは損失率はほぼボーム値に等しく、小型ステラレータ中ではボーム値の約3倍になった」と詳細を記した。また、損失が加熱機構に依存していない点が拡散率の値の差異よりも重要であると論じ、その根拠としてStellarator-Cでイオンサイクロトロン加熱、電子サイクロトロン加熱、オーミック加熱、加熱しない場合でボーム拡散率が一致していることを挙げている。これに加えて、スピッツァーは先述したように、Wendelstein-Iでのセシウムプラズマ閉じ込めの成果を評価し、「ポンプアウトの理論的説明は未だ不思議である」、「もし理論家が過去3年間と同じように、次の3年間に新しい不安定性を発掘するならば、我々は次の会議でさらに広範囲に様々な可能性を持つ装置を選択する必要がある」と述べた。

英国ギブソンA.Gibsonのステラレータ装置に関する報告⁹⁶⁾において、第2回IAEA会議での著しい成果として、

- (1) Stellarator-Cでの広範囲のプラズマパラメータにわたって、ボーム拡散と同程度のスケールやおおよそ同じ値となる主要な損失過程の実証⁹⁷⁾
- (2) 特に $\ell=2$ ステラレータで、セシウムプラズマがボーム時間よりも長く、支持棒での再結合によって決定される時間にわたって閉じ込めることができることの実証⁹⁷⁾

という二点が挙げられている。また、彼はトカマクの結果に関して、放電半径の不確かさのために評価することは難しいが、ボーム拡散率よりもゆっくりとした損失を示したと解釈できると評した。なお、この割合はイオンサイクロトロン共鳴加熱によるStellarator-Cでも観測され、ソ連レビデフ(Lebedev)研究所でのL-2ステラレータではボーム拡散率の $2\frac{1}{2}$ 倍のゆっくりとした拡散を見出したことに触れている。米国Stellarator-Cに関しては、

$$\tau_B = \frac{r^2 B}{25T} \times 10^{-6} \text{ sec } (B:\text{磁場[G]}, T = T_i = T_e, r:\text{プラズマ半径[cm]})^{97)}$$

というボーム時間の理論値と、オーミック加熱またはイオンサイクロトロン共鳴加熱によって生成されたプラズマ閉じ込め時間を比較し、これらの実験が理論値の2倍以内の損失率、換言すれば、閉じ込め時間はボーム時間の2倍以内の値を示した点に説き及び、閉じ込め時間が $\ell=2$ と $\ell=3$ の各場合で実質的な変化がなく、曲率の悪い部分と良い部分を結ぶ長い連結距離(円周の5~20倍)が「多数の不安定性の影響を受けやすい平均極小磁場配位をつくるようで、理論的に閉じ込めの改良を期待すべきかどうかはつきりしない」と述べている。他方、ドイツの Wendelstein-I におけるセシウムプラズマの閉じ込めについては、 $\ell=2$ ステラレータ磁場で、ボーム時間よりも18倍長い、フィルシ D.Pfirsch とシュルーター A.Schlüter が提唱した古典拡散よりも10倍速い損失を示し、 $\ell=3$ ステラレータにおいては密度 $10^8 \sim 10^{11}/\text{cm}^3$ の幅で、密度に依存せずに $10 \sim 20\text{ms}$ となり、ボーム時間(5~8秒)よりも2倍以上の値を示したことに触れて、 $\ell=2$ では対称的なプラズマを生成し、壁からの絶縁が上手くいっていたことを、 $\ell=3$ においては平衡状態をつくる上で、壁に流れる二次電流の効果が必要とされることを特記している。このほか、ギブソンは「単一粒子の閉じ込めや、磁気面の安定性と存在に関する基礎問題は、会議において結論は出されなかった」としている。さらに、磁場の摂動の重要性に関しても疑いがあるとし、「プリンストンとガルヒンの実験は不完全な円形巻線(コイル)が磁気面を破壊しているかもしれない」との見解も記していた。

他方、内部導体系装置に関して論評を加えていたビッカートンは、ステラレータやトカマクの実験にも言及している⁹⁸⁾。ステラレータでは、米国 Stellarator-C やソ連 L-2 において閉じ込め時間はボーム拡散に支配されていたが、唯一 Wendelstein-I ではボーム拡散よりも長い閉じ込め時間を示した点を比較して、

- (1) 閉じた磁気面を形成するための磁力線の失敗
- (2) 有限なラーマー半径と空間電荷効果を含むときの平衡の欠如なしで形成された磁気面
- (3) ロスコーンの存在
- (4) オーミック加熱やサイクロトロン加熱などの加熱や充填に関連した不安定性
- (5) 様々な型式の抵抗性不安定性
- (6) 微視的不安定性

がステラレータ配位での悪い閉じ込め要因であったとしている⁹⁹⁾。そして実験データに関して、既存の理論計算値から安定性についての検証を行っている。その結果、抵抗性不安定性についての最近の理論研究を考慮した場合、Stellarator-C では観測された閉じ込め時間を説明できたのに対して、Wendelstein-I では Stellarator-C よりも成長率が 10^2 倍低くなり、閉じ込め時間の長さとも対応していた。この原因として、ビッカートンはセシウムの質量効果であると結論している。その一方、微視的不安定性の安定化に関する検証を行ったところ、Stellarator-C はシア安定化の定式の基準を満足するのに対して、シアレスな $-V''$ 系での安定

化機構で Wendelstein-I は同基準を満足せず、「現在の理論では実験的観測を満たさない」というのがビッカートンの結論であった。このようなステラレータに関する報告に続いて、ビッカートンはソ連トカマク装置の発表に言及している。その中で、彼はトカマク T-3 の実験では、粒子の閉じ込め時間 $\tau_p \sim 8 - 16\text{ms}$ と比較して、最大可能な半径でボーム時間が $\tau_B \sim 6\text{ms}$ となるので、「実験誤差の範囲内で、閉じ込め時間はボーム値よりも明らかに大きいと言えない」と総括した。また、トカマクの電流分布が分からないため、「不安定性に関しては詳細を言及できない」としながらも、「おそらく $l=2$ ステラレータと密接に関係していて、小さな負の V'' を持ちそうである」としている¹⁰⁰。一応、第2回 IAEA 会議でアルティモービッチらによってトカマクに関する情報が一斉に公開されたとされているが、その情報の理解に欧米諸国の研究者は苦勞していたことがビッカートンの報告からうかがえる。

3.4 各国でのテータピンチ実験

第1回 IAEA 会議で日本人出席者が注目していたテータピンチの実験に関して、第2回 IAEA 会議の報告では、森と長尾がその成果に関する概要を記している。森はテータピンチ実験の具体的な発表内容については論じていないが、第1回 IAEA 会議に比べて「大変な進歩をしたもの」と評した¹⁰¹。その根拠として、「非常に精密な(θ 方向に一様な)磁場を造り、不純物も1%以下あるいは0.1%以下にして安定なプラズマを相当長時間($\leq 20\mu\text{s}$)得て」いることを挙げている¹⁰¹。さらに、テータピンチはそれ自身比較的手軽に高温($> 100\text{eV}$)のプラズマを得る方法としての位置が確立した一方、将来の方針として安定に見えるプラズマの物理をやるか、装置のスケールアップを図るかの岐路に立っているというのが、森による現状分析の結論であった。唯一、具体的な内容として、コルプがテータピンチ装置に Ioffe-bar を付加したことで、プラズマドリフトを抑えることに成功した反面、プラズマ回転を励起し不安定になる写真を提示したが、「主磁場が $5 \times 10^4\text{G}$ の時に 1000G くらいの $\text{min.}B$ 的磁場を加えても、実際に磁気井戸を造ることは出来ず、むしろ B_z によるドリフトを起すだけである」とアルティモービッチがコメントしたことを特記し、森はアルティモービッチの発言を「素直な解釈」として、コルプは「一本とられた感じ」との印象を述べている¹⁰²。他方、長尾は9件のテータピンチ関連の発表が行われたことを「 θ pincher と呼ばれる人々によって、約半日つぶしてなされた」と表現した⁸⁰。彼はテータピンチが磁場の不整や大電流のクローバー技術などの段階を脱し、やっと物理らしくなってきたという宮原昭の見解を述べた後、会議での状況として「End loss が最大の問題であるから、将来は Torus 型にするとか、cusp を両側に設けるなどの案が舞台裏では着々と準備されているらしい」とする一方、「 1km くらいまで長くすれば良い」という冷かす発言も会議中に聞かれたとしている⁸⁰。

米国ファースの報告におけるテータピンチ装置の発表への見解は、先ず炉設計の技術改良として、次の三つの道筋を挙げている¹⁰³；

- (1) テータピンチの長さのスケールリングによってプラズマ閉じ込め時間を延ばす。
- (2) 反転磁場によって磁力線を閉じる。

(3) トロイダルテータピンチによって磁力線を閉じる。

(1)に関しては、当時 2m 以上の長さで 100kG の巨大なテータピンチにて既に実験が行われていたが、ファースは「かなり費用が掛かるように見える」と批判的であった。一方、(2)はコルブラがエンドトラップ磁場における古典的減衰時間を見出した点に触れて、開放端よりもいくぶん長いプラズマ閉じ込めを得ていることに言及した。(3)の観点では、比較的低温プラズマ(～50eV)でレーミーE.Remy らが首尾よく装置を使用していたことに加えて、巨大スケールのトロイダル平均最小磁場による実験がロスアラモスで検討中であることを特記している。その上でファースは、「テータピンチは高ベータ値での良いプラズマのふるまいを説明してくれるが、古典的な端損失を妨げるためには根本的発展が必要である」と評した¹⁰⁴⁾。

米国スピツァーの報告では、ピンチ装置への関心が第 2 回 IAEA 会議でも継続していて、その中でもテータピンチによる研究革新が制御核融合研究計画の進展に重要な指示を与えるものと評価している¹⁰⁵⁾。また、テータピンチ装置はレーリー・テラー不安定性などのトピックスを含む広範囲な調査のための研究装置として使用され、さらにプラズマ閉じ込めの主要問題として最も重要な一段階である「ゆっくりとしたプラズマドリフト」の原因となる横断磁場やプラズマの非均質を除外するための磁場の改善も行なわれたことにも触れている。なお、米国ロスアラモス研究所ではプラズマの長さを増すことにより、より短時間での交換型不安定性が観測され、さらに鋭く曲げられた装置系においては同不安定性が消失することを観測したことも述べられていた。さらに、米国海軍研究所の実験では、反転磁場が端損失を減らすことで、keV 単位のプラズマを観測したことも挙げられている。そして、スピツァーは「より長い閉じ込め時間を達成するとき、圧縮されたプラズマはプラズマ閉じ込めについてのさらなる情報をもたらすだろう」と総括している¹⁰⁵⁾。

英国カラム研究所のニブレット G.B.F.Niblett は、同研究所で遂行しているテータピンチ実験も踏まえて、会議の発表内容を取り纏めている¹⁰⁶⁾。ニブレットによると、第 2 回 IAEA 会議で上手く明らかにされたテータピンチ実験の局面は、閉じ込めコイルを横切るプラズマの放射状ドリフトが、磁場の最小曲率を保證するようにコレクター板を注意深く設計することによって除去できるという立証であったとしている。その上で、エネルギー損失過程に関しては、制動放射と熱伝導によるエネルギー損失から観測されたプラズマ冷却の機構を説明できそうではあるが、酸素といった不純物による閉じ込めへの効果が明確にならないと、エネルギー損失機構を区分けする根拠が不十分であり、さらなる多くの実験的研究が必要としている。次に、ニブレットは第 2 回 IAEA 会議で報告された系の端での磁気開口部を通じてのプラズマ損失率に関して、ロスアラモス(1m コイル)とカラム(2m コイル)での損失時間が関連性を示したことに言及し、「それらは外部ミラーをとまわず、プラズマが音波輸送時間の約 2 倍まで閉じ込められる」ことを示唆したと述べている¹⁰⁶⁾。他方、米国海軍研究所で報告された反転磁場配位の実験も特記事項として報告に挙げられている。海軍研究所の実験では、2kG の反転磁場によって透過する準イオン化プラズマが捕捉され、最終

的に $10^{17}/\text{cm}^3$ の密度と 900eV の電子およびイオンの温度を達成するように、ゆっくりと圧縮されている。この時、高温の電子温度のために抵抗性不安定性は生じず、閉じた磁力線配位は放電中持続していたという。そして、回転不安定性の成長にともなって約 $20\mu\text{s}$ 後に崩壊が生じている。ニブレットは同実験が「注目すべき安定性を論証した」とし、もしプラズマ回転を導く磁場の非対称性を除去できれば、閉じ込めがさらに長時間継続できるかもしれないと評した。このような実験内容の取り纏めを踏まえて、高温プラズマに対する閉じ込め容器として、テータピンチのさらなる可能性を発展させるために、広範囲にわたる調査の必要性をニブレットは示唆している。そして、彼は第2回 IAEA 会議で明らかにされた最も重要な内容として、交換型不安定性の成長に対する安定化と反転磁場配位の効果を挙げて、上記のエネルギー損失過程での放射と伝導の効果と併せて、さらなる追調査が必要であると述べている。

4. トカマクの台頭と内部導体系装置への悲観：第3回 IAEA 会議(1968年)

前章でも述べたことだが、1968年8月にソ連ノボシビルスクで開催された第3回 IAEA 会議はトカマクと内部導体系装置のその後の研究に対して、少なからず影響を与える結果をもたらすことになった。第3回 IAEA 会議では、第2回 IAEA 会議で成果を出した内部導体系装置に関するセッションが、トカマクやステラレータと同等に単独で設置された。また、会議の総括講演はアルティモービッチが閉端系装置の実験、米国のブーフスバウム S.J.Buchsbaum が開端系装置の実験、仏国のトロシェリ M.Trocheris が理論研究についてをそれぞれ担当し、さらに会議の座長であったブドカー G.I.Budker も「豊富な科学データが集められ、融合炉の設計計画が可能となった」と会議全体を取り纏めたという¹⁰⁷⁾。

表3. 第3回 IAEA 会議における各国別口頭発表数(Proceedings に基づく)¹⁰⁸⁾

	Session A	Session B	Session C	Session D	Session E	Session F	Session G	Session H	Session J	Session K	Session L	計
U.S.A.	2	0	6	3	5	6	3	3	1	5	1	35
USSR	2	5	0	3	1	1	5	4	8	0	6	35
UK	0	3	2	2	0	0	1	2	1	2	0	13
Fed. Rep. of Germany	3	0	1	1	2	0	1	0	0	2	2	12
France	0	1	0	0	4	1	0	2	1	0	0	9
Japan	1	1	0	0	1	0	0	0	1	2	0	6
Italy	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	5
Netherlands	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3
Austria	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Australia	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Poland	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Swden	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Rumania	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
計	8	11	9	9	15	9	16	11	13	12	10	123

SUMMARY OF CONFERENCE

SHOCK WAVES (Session A)

TOROIDAL CONFINEMENT I (TOKAMAK, ZETA, etc.) (Session B)

TOROIDAL CONFINEMENT II (MULTIPOLES, etc.) (Session C)

TOROIDAL CONFINEMENT III (STELLARATORS) (Session D)

DRIFT WAVES AND NON-LINEAR PHENOMENA (Session E)

TOROIDAL CONFINEMENT (THEORY), LASER-PRODUCED PLASMAS ASTRON (Session F)

CONFINEMENT BY NEUTRAL GAS, INSTABILITIES AND WAVES (Session G)

OPEN-ENDED SYSTEMS I (MIRRORS) (Session H)

HF HEATING, CONFINEMENT AND STABILIZATIONS (Session J)

OPEN-ENDED SYSTEMS II (THETA PINCH) (Session K)

TURBULENT HEATING, BEAM-PLASMA INTERACTION (Session L)

ここでも宮本の著書から、第3回 IAEA 会議の概要を引用する¹⁰⁹⁾。同会議での最大のトピックスは、トカマク T-3 の閉じ込め時間がボーム時間の 30 倍に達し、電子温度 1keV を達成したという発表であった。なお、会議では算定した電子温度の値に不確かさが指摘されたが、1keV 程度の高温プラズマを数 ms のあいだ閉じ込めたという主張は、注目を集めることになった。これに対して、Stellarator-C は依然としてボーム時間の数倍程度の閉じ込め時間、電子温度も数 10-100eV 程度で、同会議後にトカマク装置 ST へと改造されることになる。なお、ステラレータ装置は他にも多くの発表がなされており、装置 Clasp では磁場コイル系が精密に造られ、三重水素の崩壊によって出来る高エネルギー電子の閉じ込めが調査された。その結果、電子がトーラス中を 10^7 回くらい周っていることが確かめられ、ステラレータ磁場は少なくとも単一荷電粒子の閉じ込めに関して優れた性質を持っていることが証明された。また、Wendelstein-II ではバリウムプラズマの拡散が調査され、磁気面が有理面のときには共鳴損失があり、有理面の条件を避けると拡散は古典的理論で説明されると報告されたという。このほか、ミラー磁場装置 2X の実験では、 D^+ のイオンエネルギー 6-8keV、 $n \leq 5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 、 $\tau \approx 0.2 \text{ms}$ という良い結果を出しており、またレーザー・プラズマに関する研究結果も同会議で初めて発表されている。第3回 IAEA 会議の結果として、宮本は「トーラス磁場による閉じ込め研究にやっと明るい見通しが得られるようになり、研究の流れがトーラス閉じ込めに向かった」ことを特記するとともに、以下のようにアルティモービッチの総括講演での結びの部分を挙げている：「われわれは、ボームの式が表している異常損失の暗い状態から脱することができた。そしてプラズマ温度を上げ、熱核融合レベルに達することのできる道を切り開いた。」

このほかにも、ブラームスらの磁場閉じ込めの歴史を述べた著書においても、第3回 IAEA 会議は次のように表現されている¹¹⁰⁾；

少なからずそれがみんなの注意を彼らのトカマクの素晴らしいパフォーマンスに集中させたので、ノボシビルスクの 1968 年の IAEA の会議は、ロシアの主催者にとって大き

な成功であった．．．

．．．悲観は 1965 年のカラムでの IAEA 核融合会議で追い払われ始め、3 年後のノボシビルスク会議で楽観に変わった．

こういった先行研究からの帰結は、第 3 回 IAEA 会議でのトピックスが「トーラス装置の台頭」であったといえる．現に、第 3 回 IAEA 会議後からトーラス装置による閉じ込め研究が国内でも本格的に検討され始め、その結果が原研の JFT-2 とプラズマ研の JIPP-I の建設に繋がっている．そこで、本節では第 3 回 IAEA 会議に関する各国の報告でのトーラス装置、特に「内部導体系装置」、「ステラレータ」、「トカマク」に関する記述を比較する．

4.1 内部導体系装置

前章に記した第 3 回 IAEA 会議の日本国内への影響に関して述べた中でも触れたことだが、内部導体系装置への評価は第 2 回 IAEA 会議の時と比べると、第 3 回 IAEA 会議では明らかに低下したといえる．その要因となったのは、アルティモービッチの総括講演における「既存の内部導体系装置では、閉じ込め時間と磁場配位の間関係を立証することは困難であり、超伝導マルチポールという希望はあるが、時間がかかるだろう」という発言であった¹¹¹⁾．アルティモービッチの上記発言は、日本国内にも会議出席者によって報告された．前章でも挙げた奥田孝美の「内部導体系に対する不信感が過大に伝えられたかもしれない」、「内部導体系でスタートする原研中心の計画には微妙な心理的影響を与えはしないかと思うのは筆者だけではない」というコメントに加えて¹¹²⁾、山中千代衛も「内部導体系の装置は、マイクロ不安定がないのでカラム会議では評判がよかったがその後、導体系の損失もあり特に低密度、低温領域での実験であるため核融合装置につながるものではないというのが一般の評価のようである」と述べている¹¹³⁾．なお、会議で発表された内部導体系装置に関する各国の成果は、宇尾光治と田中正俊の会議報告論文に纏められている．宇尾の報告では、先ず内部導体系装置の支持棒損失を除外する方法として、「内部導体系の内部(中空孔)を液体ヘリウムで満たして超伝導状態にして、支持棒を用いずに、真空容器内に壁からはなして、浮かす事が計画されている」が、核融合炉として考えた場合には「10 時間程度の運転後に、反応を中断して、液体ヘリウムを交換する必要がある、実際的ではない」とも述べている¹¹⁴⁾．その上で言及されている第 3 回 IAEA 会議の成果としては、米国 ORNL のクアドルポールで電磁力によって 2 本の内部導体系を浮かせて、支持棒なしの実験を行なった結果、粒子損失がプローブ面積に比例する結果を得たこと、またウィスコンシン大学と Gulf General Atomic(GGA 社)のオクトポールでプラズマ損失機構と不安定性が詳細に調べられたこと、さらにプリンストン大学で Spherator(スフェレータ)実験が始まったことなどが挙げられているが、各実験のパラメータなど詳細な分析まではなされていない．以上の結果、宇尾は「この系ではオクタポールは実験を終了した段階であり、今後は Levitate された、支持棒なしのレビトロン、スフェレーター、クワドラポールに重点が移るであろう」¹¹⁴⁾と評し、大河千弘がトカマクの電流束の断面をクアドルポールの磁気面を形成できるように変形して、内部

導体を使用せずに内部導体系の長所をもつ装置の実験を準備中であると述べたことを注目すべき点として取り上げていた¹¹⁵⁾。なお、これは後に GGA 社で行われた装置ダブルット (Doublet) のことを指していたといえる。他方、田中の報告では、会議で発表されたトーラス装置(ステラレータ、トカマク、内部導体系)においてはボーム時間を超える閉じ込め時間が達成されたが、*scaling law* が正確には判明していない点が指摘されている。その上で、内部導体系装置の研究はプラズマ損失機構として、不安定性以外の原因追求が始まったと田中は分析している。その例として、カースト D.W.Kerst からウィスコンシン大学の Octapole 装置や吉川庄一ら PPPL の LM-1, SP(Spherator)-1 などを挙げている。そして、彼はこれらの実験で、いわゆる支持棒損失のほか、内部導体や壁での損失が大きかったこと、さらに吉川は損失機構として対流セルを提唱し、実験でも確認されたことを特記していた。その上で、田中は「不安定性に限らず、*loss mechanism* を幅広く追求していくのが、今後のトーラス研究の一つの方向になる」との予想を示した¹¹⁶⁾。このような見解には、JFT-1 による実験を始動する原研所属の田中によるアルティモービッチの論評への抵抗があったようにも捉えられる。

米国原子力委員会が取りまとめた第 3 回 IAEA 会議の報告¹¹⁷⁾において、同報告の導入部の執筆を担当したロバート・ハーシュ Robert L.Hirsch は、アルティモービッチの総括講演を引用するかたちで、ボーム拡散による閉じ込め制限への不安をトカマク、マルチポール(内部導体系装置)、ステラレータらの装置が一扫したことを会議のハイライトとして挙げている¹¹⁸⁾。なお、ハーシュの記述には会議の発表に関する詳細な記述はなく、同報告における具体的な発表内容の分析はファースによって行われていた¹¹⁹⁾。ファースによると、第 3 回 IAEA 会議でのトーラス装置に関する発表は、米国・英国・欧州諸国とソ連の間で傾向の違いがあったと分析している。具体的に述べると、米国や英国、欧州諸国の研究はプラズマ物理学や制御核融合のための異常拡散問題の解法を強調する傾向があったという。その反面、ソ連においては主要研究のトカマクに基づく応用的方針を重視しており、低ベータトーラス研究にかなりの取組みを割いていると評された。その上で、ファースは「低ベータトーラス研究に専念された決定的で適切な努力の中で、世界中での(研究の)急激な向上があるように見え、そしてこれはノボシビルスクでの論文選考にも影響していた」¹²⁰⁾としている。内部導体系装置の発表に関するファースの報告での記述を見てみると、同装置の発表がほとんど米国での研究成果であったことを踏まえて、内容が簡潔に言及されていた。各国の実験から帰結される一般的な結果について、ファースは磁場が強く融通が利く特性のために、同型の装置は擾乱に対する素晴らしい制御を見せ、さらに観測された擾乱のモードの性質に関するかなり詳細な情報をもたらしたと述べている。また、これらの装置がボーム時間の約 3~30 倍の閉じ込め時間を示しているにもかかわらず、とても強いシア効果もしくは磁気井戸の深さのような「理論的に安定化させる特徴」が研究者の間で思ったほど注視されていなかったことも指摘していた¹²¹⁾。その上で、ファースは「現在の実験の状態はまだかなり原始的で、観測された閉じ込め効果はリング支持棒の除去、リング対称性の改善(浮動の場合)、

(さらなる回転半径を許容する)より高いリング電流, そしてより高い温度のプラズマ注入にともなう変化である」と評し、「これらの改良を併せた新しい実験が現在進行中」であると総括した¹²¹⁾. なお, 米国以外で最も進歩した内部導体系装置の実験としては, 英国カラム研究所の Climax(クリマックス)を挙げ, 予備実験で $\tau \sim 10 \tau_{Bohm}$ という支持棒損失時間に対応する閉じ込め時間を示したことを特記していた¹²¹⁾.

英国のアレン T.K.Allen が著した第 3 回 IAEA 会議での内部導体系装置に関する発表を取り纏めた報告¹²²⁾では, 内部導体系装置で生じている粒子損失の原因についての分析が内容の中心になっている. 先ず, アレンは第 2 回 IAEA 会議の段階から, 各国で様々な配位やトロイダル磁場の付加などの工夫が凝らされた形で実験が行われて来ている点を指摘した. その上で, プラズマ生成の方法的問題への注意はさておき, 第 3 回 IAEA 会議で発表された内部導体系装置の研究が「擾乱と粒子損失機構の詳細な研究に向けられていた」と評した. なお, アレンは「いくぶん驚いたこと」として, 「擾乱か物理的支障(支持棒損失など)かのどちらかのために生じる粒子損失」と「観測された閉じ込め時間」の間には直接的関係が見出されていないことを挙げている¹²³⁾. 各実験に対するアレンの評価を列挙すると, 第 2 回 IAEA 会議でかなり注目されていたドイツの Octapole によるセシウムプラズマの閉じ込めに対して, アレンは第 2 回 IAEA 会議からの「控え目な拡張」が行われたと表現し, ボーム時間の約 60 倍の閉じ込め時間を達成したと推定されることのみが特記されていた. その一方, 米国 GGA 社の大河千弘らによるオクトポールとクアドルポールという配位間での擾乱の性質とシア効果の確認を試みた実験(詳細は次章で述べる)は, 発表内容がかなり詳細に記載されていた. アレンは大河の実験結果を踏まえて, オクトポール不安定性はかなり容易に抑えられる反面, 主要なクアドルポール不安定性は深刻であり, 同定することは困難であると結論している. 他方, プリンストン大学の LM-1 やウィスコンシン大学のオクトポール, GGA 社のクアドルポール, 米国オークリッジ国立研究所(ORNL)の浮遊クアドルポールで観測された対流セルに関しては, 弱トロイダル磁場が対流セルを抑制するという証拠はあるが, 「この実質的な問題は, もしかすると, 最も深刻な問題で, 現在最も理解が少ない」¹²⁴⁾としている. なお, これに関連して, 「対流セルが閉じ込め制限を説明する要因になる」とした吉川庄一の提案も併記されているが, これに関するアレンのコメントは記載されていない. アレンは内部導体系装置に関する発表の総括として, 「(内部導体系装置の)さらなる研究は, どの場合でも, 深刻な長期間の制限のようには見えない, この状況を解決すべきである」とし, 「同分野での進展は, 付随的な問題と装置パラメータによって厳しく制限されたことは明らかである」, 「次世代の内部導体系装置は, 支持棒損失を最小もしくは避け, さらに(誘導)電場の効果を最小にして, 実験時間を拡張するように設計する」必要があるとした. そういった意味では, ORNL の浮遊クアドルポールの実験は液体窒素を利用した「浮遊に係する有能な技術」を特徴として持つと評価している¹²⁴⁾. しかし, それ以上の言及はなく, アルティモービッチの総括講演と同様, アレンもこの技術開発には時間が有するという考えを持っていたことが見受けられる. なお, アレンは米国 UCRL の Levitron についての言

及は一切していなかった。

次に、ソ連のカドムツェフ B.B.Kadomtsev とステファノブスキー A.M.Stefanovskii がまとめた第 3 回 IAEA 会議の会議報告論文における内部導体系装置の記述を取り上げる¹²⁵⁾。彼らの分析によれば、ステラレータ磁場の複雑な配位が物理学者の間で一定の不满を長く引き起こし、その結果としてトーラス装置で軸方向に対称な磁場を用いた装置での実験を強制し、それが内部導体系装置であったとしている¹²⁵⁾。その上で、米国 UCRL の Levitron や PPPL の Spherator はトカマクの磁場配位にとっても近いと位置づけていた。会議全体を通して、カドムツェフらは内部導体系装置の実験結果には「大きな関心を持たれた」が、その反面、「技術的困難は短時間に広範囲にわたる情報の収集を不可能にさせた」と評している。この「技術的困難」は、もちろん支持棒のことを指している。そんな中でも、彼らはコーストらウィスコンシン大学のグループによって発表された容器の外壁と支持棒、内部導体系リングで個別に粒子束を観測したデータは、「オクトポール中に生成されたプラズマの思いがけなく大きい横断速度を観測」し、ステラレータのように磁場を横切るプラズマ損失が乱流による損失を大きく上回ることを捉えたものとして特記事項に挙げている。この結果は、プラズマ閉じ込め時間に対する支持棒損失が理論計算よりもさらに小さいことを示したもので、同様の結果を示した Spherator での結果を踏まえて、カドムツェフらはプラズマ閉じ込めが「磁場配位(すなわち磁気シアや磁気井戸の存在)に依存していなかった」としている¹²⁵⁾。なお、この解釈は単純に支持棒損失の少なさを示したもので、磁場配位の違いを確認した大河ら GGA 社の実験結果が引用されていない点は彼らの報告における一つの特徴である。つまり、カドムツェフとステファノブスキーの関心は、あくまでも支持棒損失に向けられていて、内部導体系装置の磁場配位転換にともなう磁気井戸の深さの違いには、そこまで関心が向けられていなかった結果といえる。現に、彼らの報告は上記の支持棒損失に引き続き、内部導体系を浮動させた装置(ORNL の浮動クアドルポールと Levitron)の発表に内容が割かれていた。そして、第 3 回 IAEA 会議で発表された内部導体系装置の実験結果を踏まえて、観測されたプラズマ閉じ込め時間はボーム時間の 10 倍から 30 倍の範囲で幅があり、装置内で内部導体系を保持する方法に依存していないと結論している。これに加えて、「さまざまな実験結果は装置とプラズマの大きな違いのために、十分な比較が出来ない」と述べる一方、「プラズマ閉じ込めの著しい改良を磁気シアもしくは磁気井戸によるプラズマの安定化効果をもたらさないことは、磁場配位の形状に明らかに鈍感なこのメカニズムの背景に反してはつきりと目立つ」とし、内部導体系装置の限界を示唆していた¹²⁵⁾。

4.2 ステラレータ

ステラレータ装置に関して、アルティモービッチによる総括を見てみると、先ずは英国ギブソン A.Gibson による発表を挙げて、真円のステラレータ装置 Proto-Cleo(プロトクレオ)が極めて良い粒子捕捉を初めて実験的に示した点を評価している。さらに、ドイツ・ガルヒン(Garching)のプラズマ物理学研究所(Institut Für Plasmaphysik)における装置 Wendelstein-II での

実験を次のように述べている¹¹¹⁾；

・・・数年間にわたって、ガルヒンの研究者は、熱イオン化によって生成された低温プラズマのステラレータでの閉じ込めについて研究を行ってきた。彼らは古典拡散理論の予言に近い(そしてボーム時間よりも桁が大きい)プラズマ閉じ込め時間を初めて得て、注目すべき結果を達成した。この結論、特に新しい Wendelstein-II ステラレータでのバリウムプラズマの実験は、かなり納得できる。

このほか、Stellarator-C では各種のプラズマ生成法を用いているが、閉じ込め時間がボーム時間を超えても、そこからはあまり長くない点を取り上げ、それを踏まえてか、次のような結論を述べている¹¹¹⁾；

しかしながら、我々は高温プラズマに対しこれらの結果を適用するにあたって、注意深くするべきである。・・・我々は、その結果、ステラレータ研究計画の科学的基礎を確かなものとするために、さらなる取り組みが必要であると結論しなければならない。この線に沿った研究は、たぶん新しいステラレータ装置の建造という結論になるだろう。・・・

各国の会議報告論文でのステラレータ実験に関する報告を見てみると、宇尾光治やファース、カドムツェフなど多くの研究者が、ドイツの Wendelstein-II による実験発表を主要成果の一つとして会議報告論文の中で取り上げている。日本人の報告から見てみると、宇尾は先ず Stellarator-C でプラズマガンからの入射によって、 $\tau/\tau_B \approx 5$ (従来の実験では ≈ 1)を得たことや、英国の Proto Cleo がコンピュータ設計による高精度の磁場配位を実現したために、Stellarator-C よりもさらに良い実験結果を得たことに触れている¹²⁶⁾。これに引き続き、報告ではドイツの Wendelstein-II におけるバリウムプラズマの結果が挙げられている。同実験ではプローブを使用せず、プラズマ内部の障害物を可能な限り小さくして、1秒間の閉じ込め時間を得ていた。宇尾は小型ステラレータを用いた実験が低温低密度のプラズマに対して、ステラレータ配位が「閉じ込め磁場として有効であること」を証明し、「炉の原型として重要な位置を占める所のステラレータ磁場実験の再出発の基礎固めをした功績は大きい」と評した¹²⁶⁾。また、「ステラレータがジュール加熱をやめて、ガン入射に変えたら、 τ/τ_B が5倍になった事は注目^{原文ママ}すべきで、ジュール加熱電流による擾乱と、壁から出る中性粒子による電荷交換損失が大きかった事を暗示している」とし、プラズマ閉じ込めとプラズマ生成方法とに関連性があることを指摘して、今後は「性能が高く、プラズマパラメータが自由に選択できるプラズマガンの開発」や「閉じこめ領域へプラズマを導くガイド磁場の研究」、「強力レーザーによる磁場内でのプラズマ発生技術の開発」などが重要な「副研究課題」になると帰結している¹²⁷⁾。田中もステラレータの発表では、基礎固めともいえる Proto Cleo の実験とバリウムプラズマでの Wendelstein-II の実験を特記している¹²⁸⁾。その他、田中は Stellarator-C での異常電気抵抗の存在と閉じ込め結果を報告に記している。異常電気抵抗については、その存在は確かなものと確認されたが、Stellarator-C の実験中で「発表された異常電気抵抗の機構が既存のものとは別物であるらしい」ことを興味深いとしている¹²⁹⁾。閉

じ込めの結果に関しては、ボーム時間を超える閉じ込め時間を達成できることは確実にあったが、「Stellarator でも Novosibirsk のものは τ が磁場の 2 乗に比例していますが、他のところでは linear」であるとして、閉じ込め時間の磁場依存性の違いが残されていることを指摘した¹¹⁶⁾。このほか、奥田は実験結果を具体的に挙げていないが、第 3 回 IAEA 会議の中心課題が内部導体系装置とステラレータで、提出論文が全て口頭発表であった点に言及している。しかし、奥田の印象としては「参加者の注意は公平に各種型式の閉じ込め磁場配位に向けられた」という¹¹²⁾。

米国 AEC の会議報告論文でのファースによるステラレータ装置の総括¹³⁰⁾では、先ずソ連の $\ell=2$ 円型ステラレータである L-1 が回転変換をとまなうプラズマガンを用いた閉じ込め実験によって $\sim 10\tau_{\text{Bohm}}$ を実現したことや、カラム研究所にある $\ell=3$ 円型の Proto Cleo が $15\tau_{\text{Bohm}}$ 以上の閉じ込め時間を示したことに触れている。その一方で、「観測された違いは診断技術の違いに大きく起因するだろう」として、ファースは 2 つの円形ステラレータ中でラングミュア(Langmuir)探針によって観測された電子温度と Stellarator-C での伝導温度が、電子温度とその結果として求められるボーム時間の決定の際に、約 2 倍の差を生じさせていると指摘した¹³¹⁾。また、装置の大きさや診断方法が Proto Cleo に良く似ており、配位は Stellarator-C と類似している PPPL での装置 Etude(エチュード)の結果が Proto Cleo と同様の結果を示したことも注目すべきことと評している。他方、ノボシビルスクのほぼ円型である $\ell=3$ ステラレータは、その他の実験とは純粋に異なるものとファースは位置づけた。特に、ドリフト波による中性粒子減衰を試験するために設定された実験は、いくつかの疑問を有しながらも、上手く理論的予測と一致するように見えると論じた。また、シアの増加や中性粒子の減衰をとまない、閉じ込め時間がボーム時間の 1~20 倍の間で変化し、同時に無衝突拡散の結果と同じになることなどから、Etude とノボシビルスクのステラレータ装置の結果には「類似する可能性がある」とした¹³²⁾。このほか、アルティモービッチの総括講演や日本の報告にも見られたドイツの Wendelstein-II の実験結果が、 $\tau \sim \tau_{\text{class}} \sim 100\tau_{\text{Bohm}}$ という「異常拡散を表面上は示さない」ものであった点には、バリウムプラズマを用いたことが「密度分布のさらなる正確な測定と閉じ込め時間のために増加した値を導いた」と評価している¹³²⁾。なお、「算出された閉じ込め時間は未だ完全に疑いが晴れていない」¹³²⁾と述べるとともに、重いイオンの粘性との関連性を示すことは可能で、また Stellarator-C でのキセノン実験の理論的な説明が第 3 回 IAEA 会議中で報告されたことにも触れている。以上に加えて、ファースは各国で新型のステラレータが建設されていることにも言及し、ソ連や英国、仏国での装置計画も報告中に列挙していた。

第 2 回 IAEA 会議の際にもステラレータ装置に関する報告を記していた英国カラム研究所のビッカートンとギブソンは、第 3 回 IAEA 会議でも各国のステラレータ実験に関する 8 件の結果を取り纏めた報告を記していた¹³³⁾。彼らの報告では、第 2 回 IAEA 会議以降、Wendelstein-II や CLASP(クラスプ)、Proto Cleo など 5 台の装置が新設され、さらにソ連で 3 台の新しい装置 TOR-I, TOR-II, URAGAN(ウラガン)が完成したことが挙げられている。そ

して、会議で発表された実験装置のパラメータを比較し、その多くは古典時間からのずれが10倍以内の範囲にあり、閉じ込めは異常(ボーム)損失よりも粒子間衝突によって決まっていると評価した。その上で、次世代のステラレータ装置は $\lambda_{ei}/L \sim 100, \beta \sim 1\%, r/a_i \sim 100$ というパラメータでのプラズマ閉じ込めを調査することが目的であるとの結論を述べている¹³⁴⁾。報告に挙げられている個々の実験結果に関する記述をみると、自国のステラレータであるCLASPの結果に関しては、核融合炉に必要な粒子閉じ込めがステラレータ中の閉じたドリフト面において実現できること、さらにコンピュータ計算が磁場摂動の効果に対する良い指針を与えることを挙げている。他方、装置Proto Cleoでは、プラズマ入射を使用した $l=3$ ステラレータでの閉じ込め実験が行われている。同装置では、それまでの実験から、密度減衰時間はボーム時間の約20倍であると分かっていた。これを踏まえて、ビッカートンらは第3回IAEA会議で発表された実験内容では、電子温度とプラズマ閉じ込め時間が磁場の強さに大まかに比例することが確認され、低周波領域での擾乱が電場とプラズマ密度の変化の中に見られたが、観測された損失率は小さいと見積もった点を注目していた。ソ連のステラレータ装置に関しては、レビデフ(Lebedev)研究所のL-1とノボシビルスクのステラレータ装置、SIRIUS(シリウス)などの成果が取り上げられ、特にL-1による低周波密度擾乱に関する研究成果についてが、かなり詳細に述べられている。その中では、「擾乱によるプラズマの放射状フラックスが短い閉じ込め時間に対する根拠としては余りに小さすぎること」や、「観測結果から電子温度が磁場の関数で、その結果として磁場の閉じ込め時間への依存性は注意を払う必要がある」としたベレゼヘトスキーM.S.Berezhetskyら発表者による評価や指摘が併記されていた。米国のStellarator-Cに関するグローブD.J.Groveらによる発表に関しては、イオンサイクロトロン加熱とプラズマガン入射による水素プラズマとマイクロ波生成によるキセノンプラズマの閉じ込め実験で、ボーム時間の数倍の閉じ込め時間を示したことが記載されている反面、プラズマガンとキセノンプラズマの実験には速度が非マクスウェル分布になる見解があるために、電子温度の測定には疑問が残り、閉じ込め時間の過小評価を導いたとする可能性を指摘している。また、ドイツのWendelstein-IIによるバリウムプラズマの閉じ込め実験については、プローブや装置内の支持棒表面での再結合や古典拡散による単純な粒子損失を想定したモデルと測定されたイオン密度などが一致したことを特記していた。

ソ連のカドムツェフとステファノブスキーが著した会議報告論文において、ステラレータ実験のトピックスは内部導体系装置と同様に「プラズマ閉じ込めの前段階」として残されている「磁場を横切るプラズマの異常拡散」、換言すれば「ボーム拡散」であったとしている¹³⁵⁾。また、「ボーム拡散問題への最終的な解答は未だ分かっていないにもかかわらず、幅広く興味深い多数の情報はトーラス装置で収集され、会議で報告された」とある。ステラレータの具体的報告としては、英国カラム研究所にギブソンA.Gibsonの発表を「関心がある報告」として「最初に記述すべき」と位置づけている¹³⁵⁾。カドムツェフらはギブソンの実験がステラレータ実験での完全に十分な精度でのトロイダルドリフト面の存在を実証

したことや、異常拡散が集団的現象であることを示した点を評価していた。一方で、会議で報告されたステラレータ装置でのプラズマ閉じ込め時間の測定結果は、会期中では「かなり悲観的であった」と述べている¹³⁵⁾。たしかに、カラム研究所の $\ell=3$ ステラレータやソ連科学アカデミー物理学研究所(IPAS)の $\ell=2$ ステラレータで約 $10\sim 15\tau_B$ であり、プリンストン大学の Stellarator-C でも $\sim 5\tau_B$ であった。しかし、それらは数年前に初めて観測されたものとは違って、「絶望的なものではない」とカドムツェフらは表現した。なお、彼らの報告でも Wendelstein-II の実験成果は「ほぼ古典閉じ込めを観測した」として例外的な扱いがされている。このほか、ノボシビルスク核物理学研究所で行われたステラレータは「いくぶん独特」であったと見なされ、プラズマ生存時間が衝突周波数と磁場に依存する現象は、IPAS やプリンストン大学で観測されたものとは明らかに異なった点を挙げている。そして、これらの結果を踏まえて、カドムツェフとステファノブスキーはステラレータ研究の今後に関して、「(今後)しばらくの間は、ステラレータでのプラズマの振る舞いの全体描像に対するこれらの(実験)結果との関係を確立することが、あからさまに要求される」と総括した¹³⁵⁾。

4.3 トカマク

ソ連でのみ行われていたトカマク装置での実験結果は、各国の注目を浴びていたようである。特に、第3回 IAEA 会議が自国で開催されたことも影響して、ソ連側も国家の威信をかけた実験の成果を提示した感があった。クルチャトフ研究所の見学会で実際にトカマク装置を見た内田岱二郎は、「一連の Tokamak は、正に国の威信をかけた装置であった」と述べている¹³⁶⁾。

日本人の報告でひとつ特徴的であったのは、トーラス装置に関する第3回 IAEA 会議の発表を取り纏めている宇尾の報告に、トカマクの実験成果が触れられていないことである。もちろん、トカマク実験は田中が分担したということであれば、報告に記載がない可能性は十分にあり得るが、その他にも京大でのヘリオトロン実験を先導する宇尾の立場を考えれば、彼の関心がトカマクよりもステラレータや内部導体系に関心を向けていたこととも関連があったと推察される。山中はトカマクの成果を総括して、地道な積み上げが行われた結果の出来であると評判を受けていたが、米国で追試されておらず、パラメータが独立に変えられない欠点があるので、実験の正確な判定は後日に延ばされたとしている¹³⁷⁾。この「正確な判定」というのが、英国カラム研究所チームによる電子温度の測定のことを指していたと考えられる。その一方で、トカマクの実験内容が記されている田中の報告での記述をピックアップすると、田中はソ連の「トーラス研究の主力」がトカマクにおかれ、「アメリカの分析的な方法と対照的に、いわば総合的なアプローチをとっている」と述べている¹²⁸⁾。また、彼はトカマク TM-3 で観測された異常電気抵抗に言及している。Stellarator-C の場合と同様に、第3回 IAEA 会議で発表された実験によって異常電気抵抗の存在はほぼ確定的となったが、それらはテータピンチ装置などで確認されたものとは異なり、カドムツェフ B.B.Kadomtsev らは「加速電場が Dreicer limit を越えて加速された電子が発生しても、 $T_{e//}$ を

急速に $T_{e\perp}$ にかえる機構が存在して $T_{e\perp}$ が大きくなる。その結果実験的には異常電気抵抗として観測される¹²⁹⁾として、彼らのモデルが「TM-3の実験データと定性的に一致している」と評価したことを、田中は報告の中に特記していた¹²⁹⁾。これとは別の観点として、アルティモービッチらがトカマク装置において数百 eV, $10^{13}/\text{cm}^3$ のプラズマで、 τ_E (エネルギー保持時間)/ $\tau_B \approx 30$ を達成したと主張していることについて、ミラー磁場装置での hot electron の長時間閉じ込めとの比較から、トカマクは単に hot electron が長い時間閉じ込められているだけという悲観的な見方も不可能ではないとされ、カドムツェフらも「一応 estimate」していたと述べている¹²⁹⁾。しかし、アルティモービッチは楽観的な見方をしていたようで、カラム研との共同研究も、このような疑問に答えるためにピーズ R.S.Pease とアルティモービッチのあいだで取り決められたようである。なお、トラス装置に関するインフォーマルミーティングでのファースとアルティモービッチのやり取りは、複数の日本人研究者が記録にとどめている¹¹⁶⁾¹³⁶⁾。ファースは磁場を横断する拡散機構を追求する上での内部導体系装置の利点を強調し、さらに「そばに Sagdeev という天才の理論家がいるのに何で、Tokamak は半経験的なすすめ方をしてゆくのかわ」と鋭い質問をしていたという。これに対して、アルティモービッチはトカマクで物理をやることは十分可能であり、トカマクの可能性を徹底的に追求することに自信をみせていたようである¹¹⁶⁾。また、サグデューフ R.Z.Sagdeev もファースの質問に対して「それはやる人による」と逸らしていたという¹³⁶⁾。このあたりも、米ソ間の研究アプローチの違いが如実に表れた部分であったといえる。

米国の報告におけるトカマク実験の記述を見てみると、ハーシュによる導入部分にも、会議のハイライトとして「アルティモービッチが得意気にトカマクの現状を報告し、世界で最も高温、高密度、長い閉じ込め時間を提示していたことが挙げられる」という記述が見られ、トカマク装置に関心が向けられていたことが見て取れる¹³⁸⁾。他方、ファースによる発表内容の分析結果では、ボーム公式で用いられた電子温度が反磁性測定から得られたものであるならば、測定されたエネルギー閉じ込め時間 τ_E はボーム時間の 30~50 倍以上に及んでいるという点に関しては「一般的な同意はいくぶん出来る」と評している¹³⁹⁾。しかし、その一方で、反磁性測定からの電子温度とスピッツァー抵抗からの電子温度の不一致(後者の方が低い)や逃走電子など非マクスウェル分布に起因する問題を提起し、ステラレータやレビトロン等の実験結果と一致する点もあるが、重大な違いも有していることを指摘した。そして、ファースは「トカマク実験における未解決問題」として、「電子の熱い成分と冷たい成分での温度と密度の比の大きさはどのくらいか」、「良い閉じ込めに対して電子の熱い成分はどの程度無衝突なのか」、「冷たい成分の存在は熱い成分の安定性に必要とされているのか」を挙げ、追調査の必要性を主張している¹³⁹⁾。

他方、英国の報告において、トカマクはピンチ装置のひとつとして取り扱われ、ボビン H.A.B.Bodin によって分析が行われた¹⁴⁰⁾。クルスカール-シャフラノフ極限以下のトカマクが MHD 安定性を達成した際に、閉じ込め時間が著しく増加するという「説得力のある実験的根拠」を示したことが、ボビンの報告冒頭に記されている。エネルギー閉じ込め時間がボー

ム時間の 30 倍を超えたという結果を示したトカマク装置の実験結果に関して、ボビンはアルティモービッチによる発表内容をその細部にまでわたって報告に記載していた。ところで、トカマク装置 T-3 と TM-3 の実験データはとても類似していたが、会議で発表された測定値は小型の TM-3 の方のみであった。しかし、ボビンは T-3 の方が示した最も長い閉じ込め時間の値は注目に値するとしている。また、トカマクの実験結果は 1967 年にストックホルムで開催されたヨーロッパプラズマ物理学会議(European Plasma Physics Meeting)で発表されたものから進展し、さらなる詳細な結果が第 3 回 IAEA 会議では報告されたとしている。注目すべき具体的な項目として、ボビンは次の四点を挙げている¹⁴¹⁾；

- (1) 低圧下で観測された電子加熱と異常電気抵抗.
- (2) 高圧下で発見された平衡位置での異常遷移.
- (3) 高電流や高磁場で、ボーム時間の 30 倍以上を示すエネルギー閉じ込め時間はストックホルムでの会議から増加していなかった.
- (4) 分光技術を用いた粒子閉じ込め時間 τ_n に関して、新しい測定結果が報告され、 $\tau_n \sim 2 - 4 \times \tau_E$ と判断された.

そして、これらの結果を踏まえて、トカマク装置はボーム時間の数十倍の間、熱く、比較的濃いプラズマを閉じ込めるが、現段階で未だ、例えば平衡、異常電子加熱、逃走電子、時間の関数としての閉じ込め時間の特性、圧力勾配が正の値の際に軸付近で生じる局所的な交換型不安定性の可能性、圧力が上がるにつれて電子加熱が難しくなることなど、「答えが与えられていない疑問ある」と捉えて、トカマク装置への疑問を呈している¹⁴²⁾。このように、他国で全く追試が行われていないトカマク装置への疑問は、第 3 回 IAEA 会議の際にも解決できていないというのが実状であった。

ソ連カドムツェフとステファノブスキーの報告において、彼らは「達成されたプラズマパラメータによって判断すると、最も進んだ装置はトカマク型のものである」と評し、会議では「それらの装置でのプラズマ研究に基づくアカデミシャン L.A.アルティモービッチによる報告は、再び“トカマク”磁気系の利点を生き生きと論証した」と表現した¹⁴³⁾。また、「かなり深い磁気井戸、かなり大きなシア、そして最終的には系の軸対称性」は、とても高いパラメータのプラズマ(密度 10^{14}cm^{-3} 以上、温度 300-500 万度)を達成することを研究者に可能にしたとし、とても重要な結果は「系の粒子の生存時間が、ボーム時間よりもかなり長い一方で、プラズマの熱分離(thermal isolation)が増加した温度や密度でさらに悪くならないという結論」であったと述べている¹⁴³⁾。これに加えて、古典拡散時間の同等なオーダーで、ボーム時間の 50 倍大きい「平均粒子生存時間」が分光器測定から決定されたことも報告には併記されていた。その上で、彼らは「トカマク中で最大の閉じ込めエネルギーが観測されたことは興味深い」としながらも、安定化の機構とその理由がはっきりしていない点を指摘している¹⁴³⁾。このように、日・米・英の研究者の報告と比較すれば、当然ながらカドムツェフらは自国のトカマク実験に対して高評価を与えていた。しかし、それでも安定化機構が理論的に不明確であった点は、日・米・英の研究者と同じように疑問を呈していた。

5. 本章のまとめ

本章では、1960年代に開催されたIAEA会議の出席者が記した会議報告論文について、第1回IAEA会議は内容の全てを、第2回IAEA会議はIoffe-barや内部導体系装置などのいくつかのトピックスに分けて、さらに第3回IAEA会議はこれ以降、プラズマ閉じ込め研究の主力となるトーラス装置に限って、その記載事項を取り上げてきた。

第1回IAEA会議(1961年)に関する日本人出席者の会議報告論文には、核融合研究開発史の中で当時のepoch-makingと位置づけられた、ヨッフェらソ連の研究者によるIoffe-barを付加した複合ミラー磁場実験について、一切の記載が見られなかった。このことは、第4章にも記したように後年に日本国内でも問題視され、その要因は国内での準備不足にあると結論された。ただ、そうは言っても、テータピンチや基礎実験に関する第1回IAEA会議での発表は、関口や小島の報告に詳細な記述があり、会議でのトピックスが国内に全く伝達されなかった訳ではなかった。また、例えば、英国研究者の報告でもテータピンチに関する第1回IAEA会議の報告が詳述されているなど、日本人出席者が注目した内容が全くの的外れということでもなかったといえる。しかし、今回調査できた米国、英国、ソ連の研究者全てがIoffe-barの実験内容を報告の中に記していたことを考えれば、日本人出席者および第1回IAEA会議の内容把握に努めなかった日本人研究者全体は、嵯峨根遼吉の発言にあるように、「タガがゆがんでいる」と言わざるを得ないのかもしれない¹⁴⁴⁾。その一方で、米国や英国、さらにはヨッフェと同じソ連の研究者までもが、Ioffe-barの結果は初めて提示されたものであることを踏まえて、未だ慎重な見方をしており、追試実験の必要性を述べていたことは注目すべき点である。特に、米国UCRLのポストやファースの会議報告論文での記述は、自身らが行っているミラー装置実験の優位性を主張する観点も相俟って、同成果をpost deadline paperとして提示したヨッフェや、Ioffe-barを「複合磁場」と称して「ミラー磁場」とは位置づけていなかったアルティモービッチに対して、批判的な論調の文章を報告内に記していた。他方、核融合研究開発史で取り上げられることが多い第1回IAEA会議の総括講演におけるアルティモービッチの「煉獄」発言は、意外にも英国研究者の報告以外には記載がなかった。この「煉獄」発言は、当時、異常拡散によって完全に壁にぶつかっていた研究の実情を上手く表現し、第3回IAEA会議までの異常拡散およびMHD不安定性の制御と理論の構築という一連の展開を称賛するために用いられることが多い。ところが、当時の研究者は「煉獄」という発言そのものには、通史で評されているほどの関心を向けておらず、むしろアルティモービッチが「煉獄」発言のあとに、

・・・この煉獄から、理想的な真空技術、磁場配位の完成、電気回路のプログラミング方式、これらを使って、静かな安定な超高温プラズマ、実験事実と触れる事によって、尚汚点のない物理的理論のアイディアのようにきれいなプラズマを手に入れて、脱出するであろう・・・²²⁾

と述べたことを踏まえて、核融合研究の将来に対して、強い意欲と展望を持っていたことが報告からうかがえた。

第1回 IAEA 会議から4年経過した1965年に開催された第2回 IAEA 会議には、日本人研究者が組織立って会議に出席したこともあって、彼らの報告は諸外国のそれと引けを取らず、多岐に渡る内容が記載されていた。また、この時には大河千弘や吉川庄一といった在米研究者や宇尾光治ら留学中の研究者の存在も影響して、情報収集が第1回 IAEA 会議の時と比較して容易に出来る環境も追い風になっていた。前回会議で多くの研究者の関心を集めた Ioffe-bar の実験は、日本人を含む全ての会議出席者の注目の的となり、今回調査できた会議報告論文全てで発表内容が詳細に記録されていた。しかし、それよりも注目を集めたのが、内部導体系装置の躍進であったといえる。ボーム時間を超える閉じ込め時間、さらに不安定性をともなわないプラズマの閉じ込めを実現した内部導体系装置による実験は、多くの研究者がその成果を称賛していた。さらに、同研究を大河が先導していた点は日本人出席者には有利に働いたと解釈できる。日本人の会議報告論文では、どれも大河ら GA 社での Toroidal Octopole での水素プラズマ閉じ込めの成果を高く評価しており、同発表は米国スピッツァーの報告でも「核融合研究における一里塚」として称賛されていた。しかし、英国のビッカートンが記した報告では、大河の成果よりもドイツのマックス・プランク研究所で行われたセシウムプラズマによる Octapole 装置での実験が、ボーム時間の5~10倍という長時間の閉じ込め時間を提示した点で、特記事項として取り扱われていた。同研究所の成果は日本人研究者の報告には一切記載はなく、米英の研究者ほどの注目はされていなかったことがうかがえる。通史では大河の成果を高く評価したものが多いが、実際にはドイツで行われた実験の方が閉じ込め時間として最長を示した点で、研究者の注目を浴びていたといえる。一方、ボーム時間の数倍程度の閉じ込めしか実現できないステラレータ装置の評価は会議報告論文において大きな差異がなかった反面、ソ連が一斉公開したトカマク実験の成果に対しては、米英の研究者たちは懐疑的であった。また、トカマクの評価に関しては、米英の研究者たちを苦心させていたことが会議報告論文から見て取れる。ファースやビッカートンの報告にもあるように、米英の研究者たちにとっては、トカマクの電流分布が判断できないことで磁気井戸やシア効果を検証できず、提示されたパラメータによるボーム拡散の評価が中心となっていた。そして、粒子閉じ込め時間がボーム時間の2倍程度を示したことから、閉じ込め時間がボーム時間よりも明らかに大きいとは評価できないという結論が導き出されていた。このように、アルティモービッチらによって一斉公開されたソ連のトカマク装置であったが、第2回 IAEA 会議の場では未だ高い評価を受けることはなかったといえる。

1968年開催の第3回 IAEA 会議の頃になると、内部導体系装置の追試実験が各国で盛んに行われ、その成果は同会議でも発表されている。日本においても、原研の JFT-1 に代表されるような内部導体系装置での実験が始動する方向で研究計画が進んでいた。しかし、第3回 IAEA 会議での発表を総じて出された結論は、内部導体系装置への悲観であった。これは、アルティモービッチによる総括講演が一因になったわけだが、日本の田中(原研)や米国のファースの会議報告論文では、そこまで否定的な見解が示されていなかった。そこには、

自国で計画中もしくは進行中である内部導体系装置の研究に対する擁護という面も然ることながら、米国での分析的手法とソ連での総合装置的手法という研究スタイルの違いにも要因があったといえる。しかし、日本人でも宇尾や奥田、さらにソ連や英国の報告では、会議で発表された内容に関しては一定の評価を与えながらも、アルティモービッチの総括講演を踏まえて、内部導体系装置の将来には支持棒損失を除去するための技術的困難があると論じており、会議報告論文上では執筆者の立場によって内部導体系装置の評価が二分する結果となっていた。一方、ステラレータに関する会議報告論文での記載は、第2回IAEA会議の時と大きな違いは見られなかったが、トカマク T-3 と TM-3 によるボーム時間の30倍を超えるエネルギー閉じ込め時間という画期的な成果に対しては、米・英の研究者は第2回IAEA会議の頃と比べると、それなりに高い評価を与えていたといえる。会場でアルティモービッチらと激論を交わしていた米国ファースはトカマクの閉じ込め時間を「一般的な同意はいくぶん出来る」と評し、英国ボビンも T-3 が示した最も長い閉じ込め時間の値は注目に値するとしていた。その一方で、彼らは平衡や異常電子加熱などに関しては疑問が解消できていないとし、完全にその成果を評価しているわけではなかったといえる。なお、日本人研究者もインフォーマルミーティング会場などでの米ソ間の論争などを報告に記し、トカマクに対する評価は米・英と大きな違いはなかった。これは換言すれば、第3回IAEA会議の段階では、トカマク装置への疑いは完全に払拭されていなかったことを意味し、この後に世界的に吹き荒れる「トカマク旋風」は、第3回IAEA会議以降に行われた英国カラム研究所チームのレーザー散乱による電子温度の測定結果を待たねばならなかった。

以上のように、IAEA会議の会議報告論文をみると、例えば、第1回IAEA会議におけるIoffe-barの評価や「煉獄」発言の位置づけ、第2回IAEA会議での大河によるOctopoleによる水素プラズマの閉じ込め実験や、ドイツのWendelstein-IとOctopole装置でのセシウムプラズマ閉じ込め実験の評価は、これまでの核融合研究開発史の中での位置づけとは異なっていた。その反面、第3回IAEA会議で発表されたトカマク実験の会議報告論文での捉え方は、通史での位置づけとの大きな差異は見られず、この評価が一般的なものであったことがうかがえる。しかし、内部導体系装置の成果に関しては、会議報告論文執筆者の立場によって評価が異なっていたことが本調査・研究から明らかとなった。このほか、別の観点として、日本人出席者の会議報告論文における内容が、諸外国のものと回を重ねるごとに一致する傾向が見られた点も今回の調査における特記事項として挙げられる。そこには、第4章で論じたIAEA会議への国内の取組みも影響して、海外の研究を積極的に国内へ受容する体制が確立していったことも一因として挙げられるだろう。

なお、本章では各国の会議報告論文に記載された全ての内容を比較できてはおらず、特に第2回と第3回のIAEA会議に関しては、通史で着目されているトピックスに限って、内容の比較を行った。そのため、本章で取り扱えなかった内容については今後の課題とする。

文献と注釈

- 1) 本稿第 4 章を参照.
- 2) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of the third International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency at Novosibirsk, 1-7 August 1968*, Vol.1-2, (Vienna: IAEA, 1969).
- 3) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of the fourth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency, at Madison, USA, 17-23 June 1971*, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1971).
- 4) M.J.Forrest, N.J.Peacock, D.C.Robinson, V.V.Sannikov, P.D.Wilcock, *Measurement of the Parameters in TOKAMAK T3-A by Thomson Scattering*, CLM-R 107 (July, 1970).
- 5) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research, 1976 : proceedings of the sixth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency, at Berchtesgaden, 6-13 October 1976*, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1977).
- 6) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research, 1978 : proceedings of the seventh International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency, at Innsbruck, 23-30 August 1978*, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1979).
- 7) 前掲 3), Vol.3: 315-487.
- 8) 前掲 5): Forword.
- 9) 前掲 6), Vol.1: 3-9.
- 10) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research, 1988 : proceedings of the Twelfth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency in Nice, 12-19 October 1988*, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1989).
- 11) Fusion Energy 1996: proceedings of the Sixteenth International Conference on Fusion Energy organized by the International Atomic Energy Agency and held in Montreal, 7-11 October 1996, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1997).
- 12) *Proceedings Series Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1974, Nuclear Fusion Supplement*, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1975). / *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986, Nuclear Fusion, Supplement 1987*, Vol.1-3, (Vienna: IAEA, 1987). / *17th Fusion Energy Conference 19-24 October 1998 Yokohama, Japan, Conference Proceedings - 2001 Edition*, (Vienna: IAEA, 2001).
- 13) 植松英穂, 竹田辰興, 西尾成子 「日本における核融合研究開発の歴史」『日本物理学会誌』第 56 巻第 6 号 (2001 年), 395-402 頁.
- 14) 山本賢三『核融合の 40 年—日本が進めた巨大科学—』ERC 出版, 1997 年.
- 15) 宮本健郎「核融合をめざしたプラズマの研究」『日本物理学会誌』第 51 巻第 8 号 (1996

- 年), 549-556 頁.
- 16) C.M.Braams, P.E.Stott, *Nuclear Fusion Half a Century of magnetic Confinement Fusion Research* (IoP, 2002).
 - 17) *Nuclear fusion : Proceedings of the Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 4-9 September 1961, Salzburg, Austria*, Nuclear Fusion 1962 Supplement Part.1-3 (Vienna: IAEA, 1962-63).
 - 18) 関口忠「IAEA 主催「プラズマ物理ならびに核融合制御に関する研究」国際会議に出席して」『日本原子力学会誌』第4巻第7号(1962年), 59-65頁(特に60頁).
 - 19) 前掲18), 61頁.
 - 20) Yu. V. Gott, M. S. Ioffe, V. G. Telkovsky, “Some new results on confinement in magnetic traps, ” 前掲17), Part.3(1963): 1045-1047/English translation: 1284.
 - 21) “Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research Provisional Program” 『核融合研究』第7巻第2号(1961年), 139-148頁.
 - 22) L.A.Artsimovich, “Controlled Nuclear Fusion Research, September 1961: Review of Experimental Results,” 前掲10), Part. 1(1962): 15-20./邦訳: 吉村久光『核融合研究』第8巻第5号(1962年), 594-604頁.
 - 23) M.N.Rosenbluth, “Controlled Nuclear Fusion Research, September 1961: Review of Theoretical Results,” 前掲10), Part. 1(1962): 21-24.
 - 24) 前掲14), 65-66頁.
 - 25) 宮本健郎『プラズマ物理・核融合』財団法人東京大学出版, 2004年, 259-260頁.
 - 26) 前掲18), 63頁.
 - 27) 前掲18), 64頁.
 - 28) 前掲18), 65頁.
 - 29) 小島昌治「ザルツブルグ国際会議報告 基礎実験の諸問題」『核融合研究』第7巻第6号(1961年), 485-490頁.
 - 30) 前掲29), 490頁.
 - 31) 木原太郎「プラズマ物理核融合会議報告」『核融合研究』第7巻第4号(1961年), 329-332頁.
 - 32) 前掲31), 331頁.
 - 33) 前掲31), 332頁.
 - 34) 伏見康治「海外の核融合研究の現状と今後の見通し」『日本原子力学会誌』第4巻第4号(1962年), 53-58頁.
 - 35) 前掲34), 55-56頁.
 - 36) 前掲34), 56頁.
 - 37) 伏見康治「伏見所長の欧米通信」『核融合研究』第8巻第2号(1962年), 141-158頁.
 - 38) 伏見康治「日記(1961年8月31日~10月6日)」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID :

418-02-01).

- 39) 石井博の会議出席については、『電気試験所彙報』(第25巻第9号(1961年))内に記述がある。石井はこの後、Washingtonで同時期に開催された第2回真空国際会議(10月16日～19日)にも出席し、「冷却トラップを備えたマクラウド真空計による測定において水銀蒸気流によって生ずる重大な誤差について」を発表した。
- 40) 寺嶋由之介によると、矢崎為一はお金持ちで国際会議に出席するのが趣味であったという。
- 41) N.Christofilos, F.H.Coengsen, S.A.Colgate, H.P.Furth, J.Killeen, E.J.Lauer, W.B.Kunkel, W.A.Newcomb, R.F.Post and C.M.Van Atta, *Composite Trip Report Munich and Salzburg Conferences together with associated side trips* (UCRL-6675-T, Oct.27, 1961): 9-20.
- 42) R.F.Post, 前掲41): 9-14.
- 43) 前掲42): 9.
- 44) 前掲42): 10-11.
- 45) 前掲42): 13.
- 46) H.P.Furth, 前掲41): 14-15.
- 47) E.J.Lauer, 前掲41): 16.
- 48) W.B.Kunkel, 前掲41): 17-18.
- 49) S.A.Colgate, 前掲41): 18-19.
- 50) W.A.Newcomb, 前掲41): 20.
- 51) D.F.Jephcott, “The Salzburg Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (4th to 9th September, 1961),” *Contemporary Physics*, 4(1) (1962): 49-54.
- 52) D.R.Sweetman, “Conference on Plasma Physics and Thermonuclear Fusion, Salzburg, September, 1961,” *British Journal of Applied Physics*, 13(1962): 102.
- 53) E.I.Kuznetsev, E.P.Velihov, *Atonaja Energia* Vol.12(1962):101. : 邦訳(吉村久光訳)「プラズマ物理学と制御された熱核反応に関する国際会議」『核融合研究』第8巻第6号(1962年), 731-744頁.
- 54) M.S.Ioffe, E.E.Yushmanov, “Experimental Study of Plasma Instability in a Trap with Magnetic Stoppers,” 前掲17), Part1(1962): 177-182.
- 55) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of a Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research held by the International Atomic Energy Agency at Culham, 6-10 September 1965*, Proceedings Series, Vol.1-2, (Vienna: IAEA, 1966).
- 56) 前掲25), 260頁.
- 57) 伊藤博「カラム会議とその周辺(ヨーロッパ見たまま)」『超高温研究』第3巻第1号(1966年), 40-47頁.
- 58) 長尾重夫「核融合国際会議に参加して」『日本物理学会誌』第21巻第1号(1966年), 55-57頁.

- 59) 森茂『核融合海外出張報告(JAERI-memo 第 2106 号)』, 日本原子力研究所, 1965 年, 31-52 頁, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:096-01).
- 60) 前掲 59), 51 頁.
- 61) 前掲 59), 41 頁.
- 62) D. H. Birdsall, R. J. Briggs, S. A. Coagte, H. P. Furth, C. W. Hartman, “Shear-stabilization in the Levitron,” 前掲 55) Vol.2: 291-312 (CN-21/90).
- 63) D. Eckhardt, G. von Gierke, G. Griger, “Comparison of alkali plasma loss rates in a stellarator and in a toroidal device with minimum mean-B properties,” 前掲 55) Vol.2: 719-731 (CN-21/50).
- 64) 前掲 57), 44 頁.
- 65) 前掲 58), 57 頁.
- 66) 寺嶋由之介「カラム会議の一部の報告」『核融合研究』第 15 巻第 6 号 (1965 年), 691-712 頁.
- 67) 前掲 59), 50-51 頁.
- 68) 前掲 57), 41-42 頁.
- 69) Harold P. Furth, “A Report from the IAEA Conference… The Status of World Fusion,” *Nucleonics*, 23(12) (1965): 64-69.
- 70) 前掲 69): 68.
- 71) 前掲 69): 69.
- 72) Lyman Spitzer, Jr., “Report from Culham… 1.Experimental Plasma,” *Physics Today*, 18(12) (1965): 33-40.
- 73) 前掲 72): 38.
- 74) 前掲 72): 37.
- 75) R.J.Bickerton, “Closed line experiments”, *Summaries of results relating to plasma containment presented at the Culham conference*, (UKAEA Culham Laboratory, 1966) (CLM-L13): 1-10.
- 76) 前掲 75), 2 頁.
- 77) 前掲 75), 8 頁.
- 78) 池上英雄「TPM 由来記」『プラズマ研究所 10 年史』, 1972 年, 86 頁.
- 79) Yu. V. Gott, M. S. Ioffe, E. E. Yushmanov, “Experiments on the accumulation of a hot ion plasma in PR5,” 前掲 55), Vol.1 (1965): 35-51.
- 80) 前掲 58), 56 頁.
- 81) 前掲 66), 621-623 頁.
- 82) 前掲 57), 44 頁.
- 83) 前掲 59), 32-33 頁.
- 84) G.Francis, J.W.hill and D.W.Mason, “Containment of plasma trapped in a magnetic well,” 前掲 55), Vol.1(1965): 53-67.
- 85) A.Biguet, P.Blanc, R.Gravier, P.Lacoustey, H.Luc, C.Renaud, J.Tachon, D.Veron, “Heating and

- containment of plasma in the magnetic well in DECAII,” 前掲 55), Vol.1(1965): 69-82.
- 86) 前掲 66), 623 頁.
 - 87) 前掲 59), 48-49 頁.
 - 88) 前掲 69): 67-68.
 - 89) 前掲 72): 34-35.
 - 90) G.Francis, “Containment in Adiabatic Open-ended Traps,” 前掲 75): 53-58.
 - 91) 前掲 59), 41 頁.
 - 92) 前掲 59), 51 頁.
 - 93) 前掲 58), 57 頁.
 - 94) 前掲 69): 68-69.
 - 95) 前掲 72): 36-37.
 - 96) A.Gibson, “Stellarator-type Experiments,” 前掲 75): 11-18.
 - 97) 前掲 96): 11.
 - 98) 前掲 75): 1-7.
 - 99) 前掲 75): 1.
 - 100) 前掲 75): 8.
 - 101) 前掲 59), 49 頁.
 - 102) 前掲 59), 34 頁.
 - 103) 前掲 69): 68.
 - 104) 前掲 69): 69.
 - 105) 前掲 72): 36.
 - 106) G.B.F.Niblett, “Review of Theta-pinch experiments,” 前掲 75): 35-40.
 - 107) 「IAEA の第 3 回核融合シンポジウム終る 明るい研究の見通し」,『原子力産業新聞』昭和 43(1968)年 9 月 2 日 3 面.
 - 108) 前掲 2), Contents of Vol.1, Vol.2.
 - 109) 前掲 25), 261-262 頁.
 - 110) 前掲 16): 152./261.
 - 111) L. A. Artsimovich, “Survey on closed plasma systems (Translation of previous paper),” 前掲 2), Vol.1(1968): 11-18.
 - 112) 奥田孝美「感想」『超高温研究』第 6 巻第 2 号 (1969 年), 81-82 頁.
 - 113) 山中千代衛「ノボシビルスクの第 3 回プラズマ物理と核融合研究国際会議に出席して」『超高温研究』第 6 巻第 2 号 (1969 年), 60-67 頁(特に 63 頁).
 - 114) 宇尾光治「トーラス装置によるプラズマ閉じ込め実験の現状(ノボシビルスク会議に関連して)」『超高温研究』第 6 巻第 2 号 (1969 年), 71-74 頁(特に 71-72 頁).
 - 115) 前掲 114), 73 頁.
 - 116) 田中正俊「トーラスの 2, 3 の話題」『超高温研究』第 6 巻第 2 号 (1969 年), 75-76 頁

(特に 76 頁).

- 117) *Perspectives on Controlled Thermonuclear Research - A report on the Third IAEA Conference at Novosibirsk, August 1968-* (US AEC, Oct. 1968).
- 118) Robert L.Hirsch, "Introduction," 前掲 117): 1-4(特に 3).
- 119) Harold P.Furth, "Low β Toroidal Systems," 前掲 117): 5-13.
- 120) 前掲 119): 7.
- 121) 前掲 119): 11.
- 122) T.K.Allen, "Multipole," *Third IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Novosibirsk, August, 1968 Review of papers presented at the conference* (U.K.A.E.A. Research Group, Culham Laboratory, 1968) (CLM-L18): 29-32.
- 123) 前掲 122): 29.
- 124) 前掲 122): 32.
- 125) B.B.Kadomtsev and A.M.Stefanovskii, "Third International Conference on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion," *Soviet Atomic Energy*, 26(1) (1969): 55-61(特に 56-57).
- 126) 前掲 114), 28-29 頁.
- 127) 前掲 114), 29-30 頁.
- 128) 田中正俊「ノボシビルスク核融合会議」『日本原子力学会誌』第 11 巻第 2 号 (1968 年), 122-123 頁(特に 122 頁).
- 129) 前掲 116), 75 頁.
- 130) 前掲 119): 9-11.
- 131) 前掲 119): 9-10.
- 132) 前掲 119): 10.
- 133) R.J.Bickerton, A.Gibson, "Review of stellarator work," 前掲 122): 17-27.
- 134) 前掲 133): 27.
- 135) 前掲 125): 56.
- 136) 内田岱二郎「ノボシビルスク国際会議に参加して」『超高温研究』第 6 巻第 2 号 (1969 年), 68-70 頁(特に 70 頁).
- 137) 前掲 113), 62-63 頁.
- 138) 前掲 118): 4.
- 139) 前掲 119): 8-9.
- 140) H.A.B.Bodin, "Pinch Experiments," 前掲 122): 39-51(特に 39-43).
- 141) 前掲 140): 40-43.
- 142) 前掲 140): 43.
- 143) 前掲 125): 55.
- 144) 嗟峨根遼吉記念文集出版会『嗟峨根遼吉記念文集』, 1981 年, 235-252 頁 (第 2 部 座談会, 核融合研究の推進).

第6章 核融合分野の国際会議誘致と開催へ向けた

日本人研究者の動向

1. 本章の背景と目的

学術分野において、各国における研究活動の活発さを示す指標の一つとして「国際会議の誘致活動」を挙げることが出来る。物理学の分野についていえば、戦後日本で開催された最初の国際会議として、1953年9月に国際純粋・応用物理学連合(IUPAP)と日本学術会議の共催で開かれた第1回理論物理学国際会議(International Conference of Theoretical Physics)がある¹⁾。同会議には13か国、55名の海外研究者が招かれたほか、国内からも650名が出席し、素粒子論や核力、宇宙線、統計力学、分子理論、固体物性など物理学の様々な分野に関する研究発表が行われた³⁾。その後1960年代に入ると、1961年9月に宇宙線磁気嵐国際会議と磁気学結晶学国際会議が開かれるなど、国内で開催される国際会議は徐々にその数を増し、規模も大きくなっていった⁴⁾。久保亮五は1961年7月発刊の『日本物理学会』巻頭言において、国際会議を日本で開催する意義や重要性について、次のように述べている⁵⁾；

・・・異国趣味が外人を惹くこともあるが、この盛況は何といてもやはり、日本の物理学の国際的な成長を物語るもので、たいへん結構なことである。このごろ国際会議過剰という説もあるが、それは欧米の一部の話で、日本の研究の大部分は年に何ダースというそれらの会議についてツンボサジキにおかれている現状である。相も変わらず雀の涙ほどの学術会議の渡航費のおかげで、日本の地理的、歴史的、心理的、言語的な不利を毎度痛感させられる。

研究者の直接の話し合いは、文献的交流では代えられない価値があるし、ましてやこの頃の進歩のスピードはそういう交流をますます必要にしている。それらの機会に恵まれないわが国の研究者にとって、このような国際会議が日本で開かれ、特に若い研究者が自由に参加できることはひじょうに有益である。・・・

このように1960年代になると、国際会議の国内開催数の増加にともない、学術誌面上において関連する特集記事が目立って登場してくるようになる。1962年には、日本物理学会主催で座談会「日本で国際会議を開催する意義とその成果をめぐって」⁶⁾が企画され、国際会議を主催することの意義や予算の少なさなどの問題点について、討論が行われた。物理学以外の分野においても、1966年に東京で開催された国際癌会議の事務局長を務めた溝口歌子によって、雑誌『自然』の中で「国際会議学入門」と題する特集が数回にわたって生まれ、資料整理や事務室の開設など事務局側の対応について、経験談が事細かに報告されている⁷⁾。同時期に学術誌面上で国際会議の特集が数多く組まれた背景には、日本の学術コミュニティの中で、国内の研究促進と同時に国際交流の観点から国際会議の日本誘致および開催への対応を至急習得すべきであるという認識が高まったためであると考えられる。

前章までに取り扱った国際原子力機関(IAEA)主催で「核融合分野の国際オリンピック」⁸⁾と称される「核融合エネルギー会議(Fusion Energy Conference)」の前身である「プラズマ物

理と制御核融合に関する国際会議(International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 以下 IAEA 会議)の第 5 回会議が東京で開催されたのは、1974 年のことである。同会議はこれまでに日本で 3 度開催されており、日本原子力研究開発機構(JAEA)の前身である日本原子力研究所(JAERI)が、IAEA との共催として host institute を務めている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。なお、現在では同会議を日本に誘致する場合、IAEA 事務局との交渉窓口は外務省、実施は文部科学省が担当している¹²⁾。また、会議の費用は開催国が負担することになっているので、最終的には国が予算措置を行う必要があり、誘致には幅広い層からの熱意が必要になるという¹³⁾。

これまでに行われてきた日本の核融合分野に関する国際交流史調査では、主として国際トカマク炉(INTOR)ワークショップや国際熱核融合実験炉(ITER)における国際協力¹⁴⁾が中心で、初期の国際会議誘致に関する歴史調査はほとんど行われて来ていない。数少ない先行研究を挙げてみると、1977 年 9 月と 1980 年 5 月に日本学術会議核融合研究連絡会の下部組織である国際交流小委員会が刊行した報告書『核融合国際交流に関する現状分析と提案』¹⁵⁾と総論「核融合関係国際交流の現状分析と将来への提言」¹⁶⁾がある。同報告書では、1970 年代における国内での核融合研究の急速な展開と比較して、同分野における国際交流が立ち遅れていることを問題視し、その促進のために方策を 6 つ挙げている。この中には「国際会議の国内での開催」が含まれており、国際会議の日本開催について、その必要性を次のように述べている。

- ① 多数のわが国の研究者に国際会議への参加の機会を与える。このことは、わが国の核融合研究開発のレベルアップに極めて有効である。
- ② 外国の研究者に、わが国の核融合の研究開発の現状の認識を深めさせる。このことにより、わが国の研究開発の国際的地位はより確実なものとなる。
- ③ 国際会議の開催国には、若干の負担を課することとなるが、わが国は核融合先進国の一員として、この負担を負うべき責任を持っているといえる。

しかし同報告書には、それまでに国内で開催された国際会議について、開催までの動向に関する記述は見られない。他方、最近の例としては 2008 年 10 月に刊行された『プラズマ・核融合学会誌』第 84 巻特集号において、核融合 50 周年記念事業として行われた座談会「核融合と国際交流」¹⁷⁾が挙げられる。この中では、TEXTOR や Doublet-III などの装置に関する国際協力を中心に、座談会参加者が自身の経験を話している。しかし国際会議誘致に関する話題は、1980 年に開催されたプラズマ理工学国際会議(International Conference on Plasma Physics)についてのみで、それ以前に国内で開催された国際会議については一切触れられていない。

そこで本章では、1960 年代に国内の核融合研究者コミュニティの中で議論された IAEA 会議誘致に関する議論と 1971 年 2 月に開かれた日本初の核融合分野に特化した国際会議である「国際的トーラス討論会(Panel on Low Beta Toroidal System)」開催までの動向を追うことで、日本における核融合研究黎明期の国際交流史について、その一端を明らかにする。

2. 核融合研究黎明期における核融合研究者コミュニティの国際会議誘致に向けた動き

前章でも述べたが、日本の核融合研究開発史は研究の進展状況などから次のような時代区分がなされている¹⁸⁾。

- (1) 「核融合研究の前史時代」：第1回原子力平和利用国際会議開催以前(~1955年)
- (2) 「核融合研究黎明期」：核融合研究開発に悲観的だった時期を経て、プラズマ閉じ込め研究に曙光の見え出した時期(~1960年代末)
- (3) 「核融合研究成長期」：石油危機(1973年：第1次，1978年：第2次)の到来とともに核融合炉への期待が大きく膨らみ中小型トカマク中心に核融合研究が急速に発展し、大型トカマク JT-60 の実験が開始される時期(1970年代~1985年頃)
- (4) 「大型トカマク時代」：3大トカマクの成果や国際協力が進み、国際熱核融合実験炉 ITER 計画が進展した時期(1980年代後半~現在)

以下では、上記区分の(2)「核融合研究黎明期」における核融合研究者コミュニティの国際会議誘致に向けた動きを見ていく。

2.1 国際会議誘致論発足期(1959年~1962年)

核融合分野における国際会議を日本に誘致するという議論が核融合研究者コミュニティにおいて初めて取り上げられたのは、1959年7月11日に行われた日本学術会議第3回核融合特別委員会(融特委)¹⁹⁾の中であった。前章でも触れたが、同委員会は日本学術会議第26回総会(1958年4月)における原子力委員会の「核融合反応研究の基本方針」に基づき、1959年5月に発足したもので、当初は名古屋大学附置の共同利用研究所であるプラズマ研究所(プラズマ研)創設や日本の核融合研究体制に関する議論が行われ、プラズマ研発足後は国内の研究体制に関する将来計画や国際交流などについて議論が行われる場となった²⁰⁾。この第3回融特委において、IAEA事務局から「日本で核融合についての国際会議を開く考えがある」という旨の手紙が届いたことが紹介され、融特委としては「核融合の国際会議を日本で開催することがはっきりと決まった場合には、実現できるように改めて審議する」と決議された。

1960年代に入ると、第1回IAEA会議(開催地：ザルツブルク)²¹⁾と第5回電離気体現象国際会議(International Conference on Ionization Phenomena in Gases, 開催地：ミュンヘン)²²⁾が1961年に開催されることが判明し、核融合研究者コミュニティはこの2つの国際会議への出席者を決める作業に従事することになる。開催地や会期が近かったために、両国際会議の出席者は融特委(第17回~第20回)の中で同時に議論され、6名の研究者(小島昌治，木原太郎，関口忠，小沢保知，山田太三郎，和田重暢)を委員会推薦の出席者として決定した²³⁾。なお、伏見康治も同期間に行った文部省B項に基づく欧米の研究機関視察の際に、第1回IAEA会議に出席した。さらに長尾重夫も伏見同様、文部省B項を用いて1961年に各国の研究機関を視察している。

これらの国際会議後、日本では本格的に「国際会議の誘致」に関する議論が起こった。議

論の発起人となったのは、欧米の研究機関を視察してきた長尾と誘致対象の国際会議に出席した伏見で、1962年12月に行われたプラズマ研第9回運営委員会²⁴⁾等の委員会において、「電離気体现象国際会議を日本に誘致する」提案が二人から出された。この時の委員会に出席していた寺嶋由之介によると、当初は「1967年に電離気体现象国際会議を日本に誘致する」として話し合いが行われていたが、徐々に話が拡大して、最終的には「IAEA会議の誘致」まで話が及んだという²⁵⁾。これ以後、核融合研究者コミュニティの中で上記の両国際会議を誘致の対象として、各委員会で話し合いが行われることとなった。

長尾と伏見が国際会議誘致を提案した背景には、「創設直後のプラズマ研を世界に宣伝する」という考えがあった。このことに加えて、伏見が海外視察の際に「プラズマ研の方針は世界の大勢と一致している」という印象を持ったことも、少なからずこの時期の国際会議誘致論の発起に影響を与えたといえる。

プラズマ研が設立された1961年、初代所長に就任した伏見は所長学の勉強と各国のプラズマ研究機関調査を兼ねて、8月31日から11月30日までの3ヶ月間をかけて9カ国の研究機関を訪問し、第1回IAEA会議を含む同時期に開催された国際会議にも出席した。その際に感じた印象について、伏見は帰国後の1961年12月20日に行った講演「海外の核融合研究の現状と今後の見通し」²⁶⁾の中で次のように述べている。

・・・ヨーロッパ各地にプラズマ研究所の出来たいきさつについて、スイスのCERNできいてみた。CERNは現在Weisskopfが所長をしており、一時プラズマ研究をやる計画があったが、結局とりやめになった。とりやめになった表向きの理由は、CERNは高エネルギーの研究を行うので、プラズマのような低エネルギー領域の問題を扱うにはふさわしくないというのであるが、必ずしもそれに尽きるわけではない。元来CERNでプラズマを扱おうとしたのは、ソビエトのBudkaの唱えたプラズマ加速の原理に興味を抱いたからなのだが、検討してみると、それほど魅力のあるものではないことがわかってきたという事情もある。しかし根本的には、まずEURATOMが発足した後、原子力開発が当初の期待ほど進みの早いものではなく、EURATOMも各国に原子力発電を設けるよりも、より基礎的な研究に投資しようということになったこと。その際プラズマの研究が、例えばZETAや、Stellaratorのような巨大な装置を用いて、研究を進めることの効果が疑問視されて、CERNのようなところで集中的に行うよりも、各国が種々のアイデアで基礎的な問題を解決していく段階である、とされ、その結果各国にプラズマ研究所が、EURATOMの援助のもとに設立されたのである。名大のプラズマ研究所の方向は、客観的にはヨーロッパのこうした動向と一致したわけである・・・

この伏見の発言には、さらに訪問先で出会ったフォン・エンゲル A.von Engel やブラケット P.M.S.Blackett から、「研究模索時代には一つのものを作るのに何年も費やさずに、思いついたことが出来るだけ短時間に行えるようにしなければならない。この意味で、大型な装置を避けるべきで、同時に研究室の工作能率を上げなければならない」という指南を受けたことも影響していた²⁷⁾。第1回IAEA会議の報告を行った第22回融特委においても、伏見は

会議への出席と各国の研究機関の見学から、大型装置が未だ本格的には動いておらず、エネルギー資源面からの要請も少なくなったことから、核融合炉への緊急性や当面性が薄れてきたといえ、そのため「プラズマ物理の研究を当面の重点とする」としたプラズマ研の方針は世界の大勢と一致していたと述べている²⁸⁾。

以上から、伏見および長尾が国際会議誘致論をコミュニティの中で取り上げた背景には、海外視察の中でプラズマ研の方針が世界の大勢と一致していることが判明し、さらに国際会議誘致が現実になる数年後には、日本の核融合研究が世界的な水準に達するという自信があったためと考えられる。

2.2 国際会議誘致論活発期(1963年~1965年)

1963年になると、核融合研究者コミュニティは誘致する国際会議をIAEA会議に絞って活発に議論を行っている。この理由は、電離気体現象国際会議の開催地がこれまでに欧州諸国を出たことがなく、日本での開催が困難であると考えられたため、1963年4月7日の核融合懇談会常任委員会²⁹⁾や同年4月10日の第26回融特委³⁰⁾では、IAEA会議に絞って誘致・開催を試みる事が討議された。特に第26回融特委では、「1964年または1965年に予定されている次の会議を日本に誘致する」ことを目的として、具体的な対策が検討され始めている。また、1963年10月の核融合懇談会総会³¹⁾の時点では、「6ヶ月以内に申し込めば日本で開催できる確率も高い」という楽観的な考えが出され、直後に主催であるIAEAに会議誘致の打診が行われた。

しかし一方で、IAEA会議の誘致に際して「開催地はFusionの研究が進んでいる」という条件があったため、「(当時の)日本の現状では、会議誘致は時期尚早である」との意見もコミュニティの中で出されていた。1963年11月21日に行われた第28回融特委³²⁾では、嵯峨根遼吉がこの点に触れて、「日本での開催は、学問的にそれだけの理由が必要である」、「最も重要な条件は日本の研究の会議への寄与の如何である。この件はどうか」と関係者に質問した。この発言に対する委員会出席者の返答は、議事録に記されていない。しかし『嵯峨根遼吉記念文集』³³⁾の座談会の中で、森茂はこの嵯峨根の発言に対して、当時の関係者たちは「日本の研究の会議への寄与」という点に対して「自信がなく、結局のところ腰砕けになってしまった」と述べている。結果として、1965年開催の第2回IAEA会議は英国カラム(Culham)研究所で行われることとなり、日本での開催は実現できなかった³⁴⁾。

嵯峨根が国際会議誘致論に慎重であった理由は、同時期にカラム研を訪問して、核融合研究先進国における研究の現状を目の当たりにしたことが大きかったといえる³⁵⁾。当時の日本と英国の核融合研究を比較した場合、予算や研究環境なども含めて規模の違いは歴然としていた。そのため、嵯峨根からすれば「プラズマ研の創設」だけを持ってして、国際会議誘致を楽観視している核融合研究者コミュニティの考え方には不信感があったと考えられる。嵯峨根に関するエピソードとして、第4章でも述べた第1回IAEA会議の出席者に対する「お叱り事件」が『嵯峨根遼吉記念文集』の中で、関口忠によって紹介されている。この

ことについて再掲すると、第1回 IAEA 会議において、ソ連のヨッフエ M.S. Ioffe はミラー装置における極小磁場配位(Ioffe-bar)の実験³⁶⁾を発表し、初めて理論による予測と一致する結果を示した。これは後に核融合研究開発史上初の breakthrough であると位置づけられるものであったが、当時の日本からの出席者はその重要性を認識しておらず、学術誌に掲載された同会議の報告記事において、ヨッフエらの発表を記したものは1件も無かった³⁷⁾。その後、将来計画の議論を行う中で嵯峨根はこの点に触れて、「なぜそのような重要なエポックを見逃さずに、日本国内にいち早く紹介できなかったのか？君たちはどこかタガがゆるんでいる」と発言して、出席者を一喝したという。このお叱り事件があったためか、第2回 IAEA 会議では事前に対応が検討され、発表内容の把握に対策が講じられることになる。以上のことから見ても、嵯峨根の発言は核融合研究者コミュニティの中で大きな影響力を持っていたといえる。また、その発言はコミュニティの問題点を是正し、日本での核融合研究の進展に大きく寄与したことがうかがえる。

嵯峨根の発言も影響してか1964年になると、第2回 IAEA 会議と同時期にベオグラードで開催された第7回電離気体现象国際会議³⁸⁾への対応が中心となり、核融合研究者コミュニティで国際会議誘致論は中心議題として取り扱われなくなる。しかし、会議が開催される1965年に入ると、出席者決定の過程で再び国際会議誘致の議論が出されてくる。これは、日本放電学会が電離気体现象国際会議の日本誘致に向けて動き出したことに端を発しており、1965年4月15日の第32回融特委³⁹⁾では IAEA 会議と電離気体现象国際会議の誘致に関して再び議論が行われている。その結果、1971年に両国際会議が同時に開催されるので、核融合研究者コミュニティとしては両会議の誘致を狙って行動していくこととなった。その後、1965年7月の核融合懇談会総会⁴⁰⁾の中で、コミュニティとしては資金的な問題もあるので、第2回 IAEA 会議の出席者が会議開催地であるカラムで国際会議誘致を実現するための調査も行ってくると決議し、結論は会議後に先送りとなった。

2.3 国際会議誘致論衰退期(1966年~1969年)

第2回 IAEA 会議後、上述の通り、核融合研究者コミュニティは同会議で判明した理論的・技術的な革新を国内に伝達させるための活動に従事することになる。第2回 IAEA 会議での各国の発表を報告する研究会が数多く開催されたほか、当時研究の先進国でありながら、その進展状況が正確に分からなかったソ連の発表論文に対する翻訳作業も行われた。しかし、これに比例する形でコミュニティ内での国際会議誘致に関する議論の機会は少なくなり、中心議題は「日本の核融合研究に関する将来計画」へと完全に移行した。その中核を担ったのが、関口忠を委員長とする融特委内の第2次将来計画小委員会である⁴¹⁾。

結局、1966年から68年までの3年間で、国際会議誘致に関する議論は、核融合研究者コミュニティの各委員会では取り上げられることはなかった。なお、この期間に融特委は解消(1966年6月)され、日本学術会議原子力特別委員会(力特委)の中に核融合部会(部会長 嵯峨根遼吉)が設けられることになる⁴²⁾。これに加えて、1968年には第3回 IAEA 会議⁴³⁾がソ連

のノボシビルスク(Novosibirsk)で開催され、第4章でも述べたように、同会議への出席者決議は核融合部会内の国際交流小委員会が対応した⁴⁴⁾。

3. 「国際的トーラス討論会」開催までの動向

核融合研究者コミュニティで次に国際会議誘致論が起こったのは、第3回IAEA会議で発表されたソ連のトカマクによる実験結果をカラム研のグループが当時最先端の技術であったレーザーによる温度計測装置によって確認したことにより、世界にトカマク旋風が吹き始めた1969年のことであった⁴⁵⁾。同年の力特委核融合部会(第8期第1回)⁴⁶⁾で、「国際的トーラス討論会(Panel on Low Beta Toroidal Systems)」の開催についての提案が、さらに力特委核融合部会(第8期第2回)⁴⁷⁾において1974年頃にIAEA会議を日本に誘致するという議題が出されている。これ以降、核融合研究者コミュニティではこの二つの国際会議実施に向けた動きが急速に進んでいくことになる。以下では、1971年2月に開催された日本初の核融合分野に特化した国際会議である日本原子力研究所(以下、原研)主催の「国際的トーラス討論会」開催までの動向を追う。

3.1 国際的トーラス討論会開催に関する議論の起こり

国際的トーラス討論会開催についての議題が核融合研究者コミュニティで初めて取り上げられたのは、1969年5月15日に行われた力特委核融合部会(第8期第1回)⁴⁶⁾であった。同部会内の国際交流小委報告において森茂より、ソ連のラビノービッチ M.S.Rabinovich から日本でトーラス閉じ込めに関する国際研究会が開催可能かという問合せがあったこと、そして核融合部会の賛同が得られるようならば、原研として予算要求を行うことが報告された。上記ラビノービッチからの問合せとは、以下に示す伏見康治宛に送られた同氏からの書簡(1969年4月29日付)を指すと考えられる⁴⁸⁾。

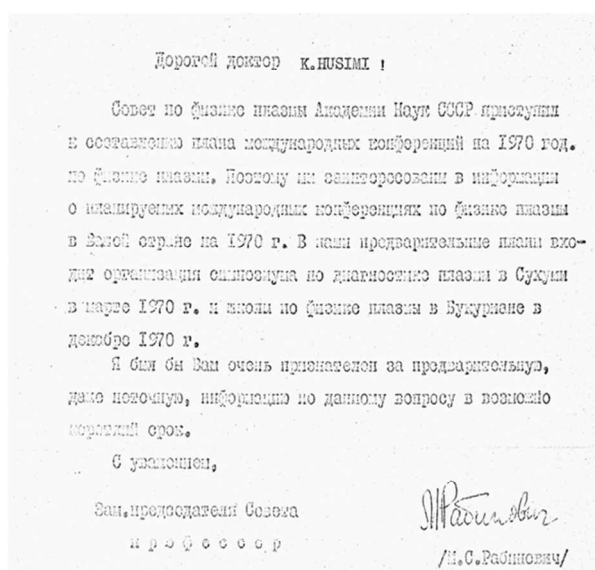


図2. M.ラビノービッチ→伏見康治への書簡。

[書簡の日本語訳]

伏見博士

1969年4月29日

拝啓

ソ連邦科学アカデミープラズマ物理学委員会では1970年のプラズマ物理関係諸国際会議計画立案に着手して居ります。1970年に貴国で計画されるプラズマ物理関係諸国際会議の情報に関心を持つ次第です。私達の予備的な計画では、1970年3月スフミに於けるプラズマ診断のシンポジウム、1970年12月ブクリアンに於けるプラズマ物理の学校を予定しています。

この件に関しまして予備的な、例え正確でなくとも情報を可及的すみやかにお知らせ下されれば幸いです。

敬具

副委員長

ラビノービッチ M.S.

1970年になると、4月2日開催の核融合懇談会拡大幹事会⁴⁹⁾において、原研の昭和45年度トカマク調査費を用いて、海外研究者を交えた国際会議を開く具体的方法について国際交流小委に依頼があったこと、また海外研究者の招待用に予算として約400万円が準備されていることが森より報告される。同幹事会ではテーマや時期などが検討されたものの、最終的には力特委核融合部会の国際交流小委の中で詳細を議論することになった。その後、国際交流小委において本件に関する議論が行われ、主催ならびに予算支出は原研、後援を日本学術会議力特委核融合部会が務めることとなり、また国際会議開催に際して組織委員会を設立し、委員には宗像英二(原研理事長)と伏見、山本賢三、さらにあと3名を部会で決めることになった。1970年4月20日に行われた力特委核融合部会(第8期第4回)では、国際交流小委の委員長であった高山一男よりこれまでの各会における経過が報告され、以下のような議論が行われた⁵⁰⁾；

・・・

- トカマクを中心テーマにするよりもっと大きなテーマにしたらと思っている。
- テーマをはっきりした方が良い。
- トカマクだけでなく他も含める。長い目でみて他も含めて実績をつくる。
- 毎年ある会議ならはっきりテーマを決めてやった方が良い。
- 今後の為にも成果が出るやり方が必要である。
- 組織委員会準備会を作ってはどうか。
- トカマクを中心としたトーラスの会と了解していた。
- 規模が小さい会である。テーマを絞った方が良い。予算は400～500万円(4～5人の外国人研究者を呼ぶ)

○日本に実力が無いのでこの程度から始めたい。

．．．

その結果、組織委の設立が正式に決定し、委員には宗像、伏見、山本に加えて、森、長尾、寺嶋、宇尾光治が選出された。

3.2 国際討論会組織委員会の発足

上記委員による第1回国際討論会組織委員会打合せ⁵¹⁾は、1970年5月8日に開かれた。この第1回打合せは、先ず寺嶋、宇尾、森の三委員のみで旧東電ビル418号室海外電力調査会会議室において予備的な打合せが行われ、その後同日中に原研本部第1会議室において本委員会が開催されるという運びとなった。

寺嶋、宇尾、森の3名で行われた予備打合せでは、今回開催される国際討論会は「低ベータトーラスの研究開発のために行われ、原研のみならず全国の核融合研究者の裨益するものである」という目的を有することが確認され、英文名を“Panel on low Beta Toroidal Systems”とすることも内諾された。また、海外から5～6名の研究者を招待することとなり、招聘費用として総額400万円が見積もられた。そして招待研究者の人選については、数名の候補者を本委員会で提案し、議論することになった⁵¹⁾。

その後開かれた本委員会では、森から予備打合せの結果に関する報告と提案が行われ、討論会の目的および人選について質疑応答と議論が行われた。その結果、討論会の位置づけに関しては、「親善的な討論会」と「専門的な議題の論議を行う場」という両者の性格を持ちあわせた国際討論会として開催することが承認され、また海外研究者の招待についてはこれ以上の招聘費用増額が困難であることから、米・英・ソ・独・仏の代表的研究者(下記6名)を招聘することとなった⁵¹⁾。

米国：ゴットリーブ M.B.Gottlieb(プリンストン大学プラズマ物理学研究所(PPPL)所長)およびローズ D.J. Rose(MIT/ORNL)

英国：ピーズ R.S.Pease(カラム(Culham)研究所所長)

ソ連：アルティモーチッチ L.A. Artsimovich (クルチャトフ(Kurchatov)研究所核融合指導者)

独国：ゲルケ G.von Gierke (ガルヒン(Garching)プラズマ研究所副所長)

仏国：トロシェリ M. Trocheris (フオントネー・オー・ローズ(Fontenay-aux-Roses)研究所核融合研究所所長)

また上記研究者に加えて、在米日本人研究者である大河千弘(ガルフ・ジェネラル・アトミック, GGA 社)、吉川庄一(PPPL)らも招聘することが決まった。この他にも第1回打合せでは、(1)開催期間については1970年12月を第1案とする、(2)討論会の英文名は“Panel on low Beta Toroidal Systems”に決定する、(3)国内参加者の人選および討論会の報告書については追って検討する、(4)日本学術会議の後援要請に関しては招聘者、招聘時期の確定した時点で改めて議論することが決議された。

第1回打合せでの議論の結果は、プラズマ研第49回運営委(5月14日～15日)⁵²⁾等の各委員会で報告された。また、森から招聘予定者に対して非公式に出席を打診する書簡が送付されるなど、関係者も討論会開催に向けての準備に動き出した。

3.3 招聘者の決定と国内での論文選考の動向

組織委の第2回打合せは、1970年10月6日に原研本部第2会議室で行われた(出席者は、委員が宗像、伏見、山本、寺嶋、宇尾、長尾、天野、森、仲本、事務局が深見、半田、田中)⁵³⁾。そこでの審議事項は、(1)招聘予定者への意向打診の結果、(2)開催時期、(3)経費の検討結果、(4)討論会までの今後の日程とテーマの設定であった。同打合せでは、先ず(1)招聘予定者への打診結果が森より報告された。招聘予定者として第1回打合せで名前の挙がった研究者に打診した結果、ゴットリーブ、ピーズ、ゲルケ、大河、吉川(庄)からは出席の回答があり、ローズは職務変更のために核融合部門から離れたので代理人を推薦、さらにアルティモービッチ、トロシェリは未回答であることが報告された。これに対して、打合せでは、出欠が分からない2名については討論会の内容を拡充させるために、討論会出席を要請していくことが確認された。特に、ソ連におけるトカマク計画の大家であるアルティモービッチに対しては、討論会出席が実現するように下記のような方面からアプローチをかけて、出席を再要請することが決まった⁵³⁾。

武藤俊之助(原子力委員)を通じてソ連原子力委員・ペトロシアンツ A.Petrosyants へ
茅誠司(前学術会議議長)を通じて科学アカデミー・ケルディーシュ M.Keldysh へ
一色長敏(科学アタッシェ)を通じて政府機関へ
吉川庄一を通じてアルティモービッチ本人へ

次に(2)開催時期について議論が行われ、第1回打合せでは1970年12月開催案が出されたが、アルティモービッチ出席の可能性を高めるために、また会議開催準備や予算などを考慮した結果、1971年2月開催(2月1日～10日)の方向で最終決定する形が取られた。このことに関連して、招待講演題目ならびに国内研究発表の募集についても検討が行われ、招待講演としては次のような内容で招聘予定者ならびに関係者に依頼することになった。

伏見または山本：日本におけるトーラス研究
ゴットリーブ：アメリカにおけるトーラス研究(プリンストンを中心として)
ピーズ：Diffusion Pinch について／核融合研究概論(東海研にて、一般向けの講演)
アルティモービッチ：最近のトカマク研究
フォン・ゲルケ：ガルフィン・プラズマ研におけるトーラス研究
トロシェリ：トーラスプラズマの平衡と熱伝導(熱伝達)

他方、(3)経費の検討結果については会議費を節約して、ローズを招待しなければ大体予算の枠内で処理できるとの見通しが出された。また、(4)討論会までの今後の日程とテーマ設定については、会期中に7つのSessionを設置することや原研東海研とプラズマ研、京大での海外研究者による招待講演および懇談会を開催すること、さらに東大、理化学研究所(理

研), 電子技術総合研究所(電総研)の見学が日程に組み込まれることになった。

なお, 第2回打合せの結果を踏まえて, 1970年10月30日付で国内研究者の出席希望ならびに発表募集の通知が出されている⁵⁴⁾。同通知には, (1)低ベータトラスに関する発表を20~30分程度にまとめた発表を募集すること, (2)同発表の要旨は11月末日締切, (3)海外研究者の講演が行われること, (4)会議日程は1971年2月1日~3日の3日間, その後2月4日~11日の期間で国内のトラス実験室の見学を行うことが記された。

その後1970年12月17日, 観光ホテル21号室にて第3回組織委打合せが行われている。同打合せの議事録は未発見であるが, 森が記した議論予定事項⁵⁵⁾から下記の審議事項について議論が行われたと判断される;

第3回組織員会議事予定(案) 45.12.17

1. 前回の記録
2. 諸報告
 - 1)国内関係; 論文, 討論参加希望者, 会場など
 - 2)国外関係
3. 論文の選考(追加依頼を含む)
4. 参加者の選考
5. プログラム
6. スケジュール
7. その他(プロシーディング)

以上.

ところで, この第3回打合せまでの間に海外招待講演者として米国のグールド R.W.Gould が加わっている。グールドが招待者になったいきさつは不明であるが, おそらくローズが先に提案した自身の代理人であったと考えられる。なお, グールドは森茂に宛てた書簡⁵⁶⁾の中で, 討論会への欠席を表明している。ここで, グールド以外の海外招待者から届いた討論会への出欠に関する返書を見てみると, ゲルケは1970年11月19日付で森宛に書簡⁵⁷⁾を送り, 自身と同じ西独ガルヒン研のグリーガー G.Griger の討論会出席を提案している。これにより, グリーガーも招待講演者に加わることとなった。また, それまで連絡がなかったトロシェリの所属する仏国フォントネー・オー・ローズ研からは, 書簡(1970年11月25日付)⁵⁸⁾が宗像宛に届き, 同研からはトロシェリに代わってメルシェ C.Mercier が討論会に出席することに決まった。

これに対して, アルティモービッチ招聘のための対応は困難を極めた。森は第2回打合せ終了後の1970年10月30日に武藤俊之助の助言を受けて, ソ連大使館に直接連絡を入れている。この対応は同日に山本賢三に充てた森の書簡⁵⁹⁾の中に確認でき, 恐らくは先述した対応でもアルティモービッチ側からの返答がなかったために, 直接ソ連大使館に連絡を入れたものと思われる。しかし, 大使館からは「この件は大使館のかかわりのないことである」とそっけない返答をされたようで, 森は次の対応として以下の3点を山本への書簡の中に

記している；

1. 理事長からの招待状に、事務的なものだけでなく、Artsimovich が来てくれれば、大変有益であり、おいでをまっているという風なお世辞をつけて出すこと(これも武藤先生の御注意による).
2. 伏見先生より Artsimovich あるいは Andronitz Petrosyants(Chariman of USSR State Com. for Atomic Energy)に手紙を出してもらうこと.
3. 吉川庄一君に詳しい information を聞くこと.

1 の宗像英二→アルティモービッチ宛の書簡(1970年10月30日付)⁶⁰⁾は早急に作成され、また2についても、伏見→ペトロシアンツ宛書簡(1970年11月6日付)が JAEA 那珂核融合研究所に所蔵されている山本賢三史料の中に残されている⁶¹⁾。このような対応の結果、PPPL の吉川庄一→ゴットリーブを通じて行ったアルティモービッチへの出席要請について、アルティモービッチから下記の返信が届いたことが、1970年11月17日付の手紙で吉川(庄)から森に報告された⁶²⁾。同返信の中でアルティモービッチは、討論会出席に対して自身は参加する地位におらず、代理出席者としてシャフランノフ V.Shafranov もしくはステルコフ V.Strelkov の名を挙げている。吉川(庄)は森への手紙の中で、アルティモービッチは「家族の事情があって日本への旅行が出来ないのかも知れない」と述べている。

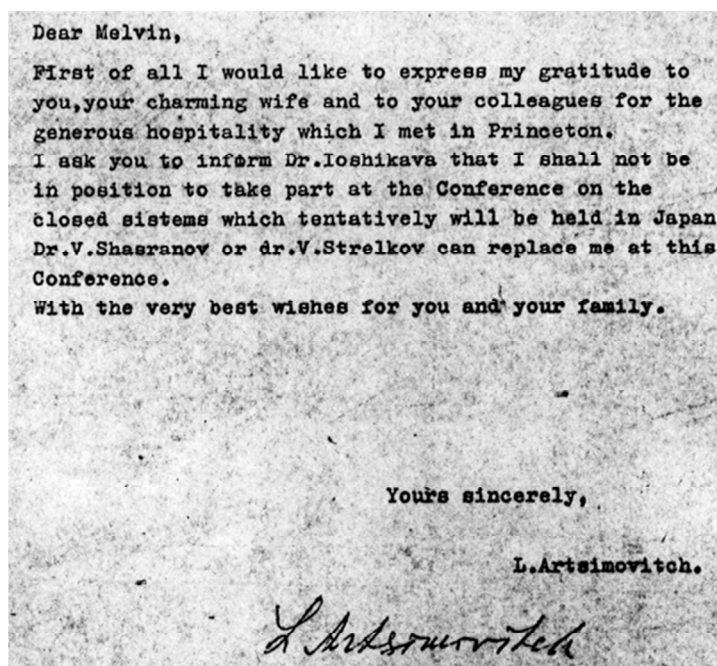


図3. L.A.アルティモービッチ→M.B.ゴットリーブ宛の書簡⁶³⁾⁶⁴⁾.

他方、討論会における国内の発表については、第3回打合せの中で選考が行われている。原研やプラズマ研をはじめとして、京大、東大、電総研、名大工学部、新潟大学、東京教育大学所属の研究者から8件の論文⁶⁵⁾が提出され、選考会において7件が討論会での発表に選出された。ところが実際には選考会の後も、大阪大学と京大の共著、日本大学、名大およびプラズマ研所属の研究者から4件の発表論文が提出され、最終的には11件の発表が討論

会で行われることになる。

なお、第3回組織委打合せの結果は、力特委核融合部会(第8期第5回, 第6回)⁶⁶⁾⁶⁷⁾および核融合懇談会総会⁶⁸⁾の場で報告され、コミュニティ内への周知が計られた。また、1970年12月23日には討論会のプログラムが会議発表者および組織委のメンバーに送付された⁶⁹⁾。そして、1971年1月21日の力特委核融合部会(第8期第7回)⁷⁰⁾で最終的な報告が森から行われ、さらに同日付で原研理事長宗像英二から発表者ならびに出席者にトーラス討論会の案内が送付された⁷¹⁾。ところで、森はこの段階になってもアルティモービッチの代理人による討論会出席のために奔走していた。1971年1月9日付の山本への書簡⁷²⁾の中で、森は宇尾よりソロウーヒン R.I.Soloukhin(ノボシビルスク(Novosibirsk)大学副総長)の話として「Artsimovich は女のように(?)事務的才能は zero に等しい。Vice president(Plasma Phys. Committee?)の M.Rabinovich はてきぱきしていて、事務的才能もあり quick response を期待できるので、彼に連絡すべきである」との情報を貰ったことを紹介し、早速ラビノービッチへ連絡を取ることを報告している。

3.4 会議報告論文から見る国際的トーラス討論会の内容

結果的には森の懸命の努力も報われず、ソ連からの参加者は出なかったものの、1971年2月1日から3日までの3日間、赤坂プリンスホテルにて核融合分野における日本初の国際討論会である「国際的トーラス討論会」が開催された。現在までの調査では同討論会の Proceedings が発見できておらず、各発表の詳細は分からない。しかし、日本原子力新聞などの新聞紙面⁷³⁾や週刊誌⁷⁴⁾において同討論会に関する特集記事が執筆されたほか、森⁷⁵⁾や伏見⁷⁶⁾などの出席者、さらに雑誌『原研』⁷⁷⁾や原研広報誌『核融合のはなし 日本原子力研究所』⁷⁸⁾に掲載された会議報告論文などから、同討論会の内容をうかがい知ることが出来る。以下では、これらの報告から同討論会での各発表について概観する。

まずは、海外からの招待講演者の発表について見ていく。西独のゲルケによる講演では、トカマク装置パルセーター(Pulsator)の設計を中心に、ガルヒン研究所における研究計画が報告された。パルセーターは当時設計・製作中で、同装置に関してゲルケは「ヘリカルな巻線、磁場の精度およびプラズマをつくったときの電流分布にとくに留意している」と述べたという。森は『日本原子力学会誌』に掲載された同討論会の会議報告論文⁷⁵⁾において、パルセーターがヘリカルコイルを用いることに注目し、同装置の特色であると述べている。一方、ゲルケと一緒に同討論会に出席したグリーガーは、ヴェンデルシュタイン(Wendelstein)計画(ステラレータおよび内部導体系装置)の概要と現状の成果、さらに今後の実験計画について講演を行なった。具体的には、運転中である W-IIa のデータと近く完成予定である W-IIb の実験計画についての詳細な解説を行い、「回転変換角を時間的に変化させて実験を行う」といった今後の見通しについても公表したという。原研広報誌⁷⁸⁾では、グリーガーが W-IIb や W-IIc, W-VII では Ohmic Heating に重点を置くとの発言をしたことに触れて、「トカマクを意識して重点をおいたもの」との見解が記されている。なお、グリーガーとゲルケはいつも

二人そろって行動していたようで、「記者会見では他国の出席者の話をニコニコしながら聞いていた」という⁷⁷⁾。また記者会見では、両者とも「核融合炉の将来は非常に明るい。環境を汚染しないエネルギー源としては高速炉よりもすぐれており、世論がそれを強く望むならば、実現はさらに早くなる」と語ったことが、『原研』に掲載された会議報告論文の中に記されていた⁷⁷⁾。

次に、英国カラム研究所の R.S.ピーズによる講演を取り上げる。討論会において、ピーズはプラズマ閉じ込めの条件についての解説とカラム研におけるトロイダル装置に関する計画の全般的な要点を発表した。先ず内部導体系装置について、ピーズは「装置がかなり大きくなりつつあり、一般にマルチポールではコンベクション(対流)がプラズマ損失をきめるといわれているが、さらにそれを追究するための実験を続けている」と述べて、超伝導コイルを用いたレビトロン型装置が計画されていることを報告した⁷⁸⁾。次にトロイダルピンチに関しては、ZETA(ゼータ, Zero Energy Thermonuclear Assembly)での実績を踏まえた高ベータトロイダルピンチ装置 HBTX による実験を開始していることに触れており、『原研』に掲載された会議報告論文には、この時に同氏が発表した HBTX のデータは参加者の注目を集めたとある⁷⁷⁾。さらに、ピーズはステラレータ研究についても言及し、英国ではシア(磁力線のずり)によるドリフト波の安定化などに重点を置いて研究が行われていること、また大規模なステラレータ装置が計画中であることも公表した。この他にも新聞社の記者会見において、

英国の核融合研究はカラムに集中しており、現在はトロイダル装置に重点をおいているが、ミラー型および全般的な工学面での研究も平行して進めている。予算的には FBR が大部分を占めているが、開発途上のテーマとしては、最大の努力を払っている。この5年間の進歩から考えて、5年後には小規模の核融合炉が開発されるかもしれない・・・という楽観的な見通しを述べていたという⁷⁷⁾。

仏国のメルシェは、自身の所属するフォントネー・オー・ローズ研のトカマク装置に関するプラズマ閉じ込め研究について報告し、トカマク装置 TFR(Tokamak de Fontenay-aux-Roses) が設計中であることや理論家としてのトカマク装置に関する評価を紹介している。特にトカマク装置の評価について、メルシェの「トカマク装置の断面を三角形状に変えた方が理論的には良い特性をもつことが示されている」という発言は、『原研』の会議報告論文においてユニークな発表と称された⁷⁷⁾。

他方、吉川(庄)と大河は米国の招待講演者として、主として内部導体系装置に関する発表を行っている。吉川(庄)は PPPL のスフェレータ装置による実験成果と将来の核融合炉実現のための理論および実験について取りまとめを発表し、大河は GGA 社における内部導体系装置の実験からトカマクと内部導体系装置の優れた点を兼備させたダブルット(Doublet)計画について報告した。森は大河、吉川(庄)の講演を受けて、

アメリカの DC オクトポール(GGA)、スフェレータ(プリンストン大)では、プラズマの閉じ込め時間は古典的拡散の数分の一となっている。そのわずかな差の原因として、磁

場誤差，対流セルなどが検討されている．この型の閉じ込め時間を延ばす点では，低 β については限界に達した．．．

との見解を報告内で述べている⁷⁵⁾．他方，原研広報誌ではダブレットによる研究展開について「常に一步先んじて研究開発を続ける大河氏の特色があらわれていた」として，大河ら GGA 社の研究を称賛している⁷⁸⁾．

海外招待講演者で最後に講演を行なった PPPL 所長ゴットリーブは，Stellarator-C をトカマク型に改造した装置 ST トカマクの実験成果と米国全般におけるトカマク計画について概説を行なった．原研広報誌に掲載されたゴットリーブの講演概要は，以下の通りである⁷⁸⁾；

昨[本稿筆者注：1970]年 5 月に C ステラレーターを改造したトカマク装置 ST の稼働を開始した．現在 T-3 と同じ結果が得られている．主な相違は電子温度分布がプラズマの中心で鋭く立ち上がっていることである．

理論との比較を計算機を使用して行なったが，これにおける発見の主要なものは，今まで疑われていた異常抵抗率や異常熱伝導率を仮定しなくても理論と実験の一致がみられる．

今後の計画では ATC(断熱的トーラス圧縮)の技術的，理論的検討が開始される．装置は今[本稿筆者注：1971]年 4 月に建設が開始され，約 1 年後に完成の予定である．この装置はトカマクプラズマを圧縮によって核融合プラズマに近づけることを目的としており，意欲的な計画として期待されている．

なお，ゴットリーブは

最近の不況とアポロ計画の反動で，予算が伸びない．(核融合炉の)70 年代に実用化の目途をつけるには，現在の 2 倍以上(約 200 億円)の予算を投入しなければならないだろう．ただ，これはエネルギー問題とも関連しており，それらの豊富な国ではそれほど切迫した問題としては考えられないかもしれない．

と記者会見で発言して，核融合炉の早期実現には予算の拡充が必須であるとの見解を述べている⁷⁷⁾．このようなゴットリーブの発言や講演内容に対して，原研・核融合研究室の船橋昭昌と伊藤智之は『科学新聞』に掲載された報告記事(昭和 46 年 2 月 26 日付)⁷⁹⁾の中で，同氏の講演からトカマク装置でソ連に一步先んじられている米国が「ソ連に追いつき，追いこせのムードで頑張っていこうとする姿勢がうかがわれた」と評した．一方，森は「ソビエトのトカマクだけでなく，アメリカなど多くの国がこの型を手掛け始めたことから，この型の核融合にとっての基礎固めがおわる日も近いであろう」と報告論文に記し⁷⁵⁾，原研がトカマク装置 JFT-2 を中心に今後の研究を進めていくことに対して，世界の趨勢とも一致している点に自信をうかがわせている．

以上のような海外招待者の講演に加えて，11 件の国内研究者による一般講演が行われた．次に森の会議報告論文から，国内研究者の発表に関する記述を追う⁷⁵⁾．森によると，プラズマ研の JIPP ステラレータ実験は，「対流セルの存在を示すような見事な実験結果」を示し，関心を集めたという．また京大のヘリオトロン D(Heliotron D)に関しては，同装置が「電子

サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)によるプラズマをボーム時間の 50 倍程度閉じ込めた」ことを評価している。さらに、日大理工の濱田繁雄による報告は「対称性のないトーラス状プラズマの平衡を一般的に議論」したもので、森の報告では、同発表における「プラズマ自身による平衡化の指摘」が参加者の注目を受けたとある。一方でトカマク装置に関しては、森の会議報告のほとんどが海外招待者の講演内容に割かれており、JFT-2 の発表については「設計および研究の狙いが報告された」という一文が記されているのみであった。これに対して船橋と伊藤の記事⁷⁹⁾では、JFT-2 の発表は「パルセーターなどと比較した場合、設計製作上での問題点はほとんど解決されており、とくに不整磁場などの検討も十分であるように思われた。また、JFT-2 で採用予定の可動リミターは、ユニークな着想」として、出席者の注目を浴びたと述べている。森の報告に戻って上記以外の国内発表の成果を見てみると、原研の内部導体系装置 JFT-1 は「ヘキサポール磁場に強いトロイダル磁場を加えた際に、最も安定な領域であるセパラトリックス近傍で密度変動が観測されたというデータ」を発表し、また電総研のスクリーピンチ零号機においては、実験から「ピッチパラメータについてプラズマが安定になるための条件」が求められたとある。さらに、プラズマ研の周期的カスプ磁場による高ベータトーラス実験について、森は「プラズマを安定に閉じ込めており、注目すべきデータを提供した」と称している。

3.5 伏見康治の会議報告論文からみるトーラス討論会の背景

次に伏見康治の会議報告論文⁷⁶⁾から、国際的トーラス討論会の背景に関する幾つかのエピソードを取り上げる。

3.5.1 アルティモービッチの招聘失敗について

伏見は、会議報告論文の冒頭で同討論会開催の経緯について、「世界的規模で吹き始めたトカマク旋風によって日本にもトカマク開発が進められ、原研、理研、電総研による大規模プロジェクト研究が起こったことから、トーラス討論会が開催されるに至った」と述べている。しかし同時に、アルティモービッチが討論会に参加しなかったこと、さらに代理も出席させなかったことへの不満も表明している。現に 1971 年 2 月 17 日、伏見はラビノービッチに書簡を送り、アルティモービッチが会議に出席しなかったことへの遺憾の意を表している。これに対してラビノービッチは、1971 年 3 月 4 日付で以下に示す内容の返信を出している⁸⁰⁾；

伏見康治教授

拝啓

2 月 17 日付お手紙拝受いたしました。トロイダル系に関する会議が御成功を収められたことをお祝いいたします。

制御熱核融合に関する国際的協力についての、あなたの御意見に全く同感です。

1968 年および 1969 年にあなたがソ連を訪問された折にもごらんになった様に、これはソ連邦の政策とも一致するものでもあります。

あなたと同じく私も会議にソ連の学者が一人も参加しなかった事を残念に思います。一つにはこれは情報の欠如あるいは遅れに起因していると思います。来年は私たちも会議に参加できるよう、1972年の日本の会議の大体の時期および場所を1971年5月～6月にお知らせ願いたく思います。

この機会を借りて、1971年10月19日～26日、キーエフ市において、プラズマ理論(トロイダル保持, ビーム・プラズマ相互作用, 異常抵抗, その他特別の問題)の会議を計画いたしていることをお知らせいたします。もし、日本の学者がこの会議に興味をお持ちでしたら、その方と接触することにより作業が著しく容易になると思いますので、参加者の名前を私にお知らせください。宮本先生によろしくお伝え下さい。

敬具

M.ラビノーヴィッチ
モスクワ 1971年3月4日

結果として、情報の遅れがソ連出席者不在の要因であり、アルティモービッチ本人に関しては病気で出席できないという旨の手紙が討論会後に届くことになる。伏見は報告内で、「今回は仕方がない」として「次の機会には是非とも出席頂きたい」と述べている。伏見がアルティモービッチの討論会出席に固執した背景には、日本におけるトカマク計画の推進、さらには諸外国のように大型装置によるプラズマ閉じ込めの研究を促進していかなければならないという考えがあったためといえる。

3.5.2 討論会の名称

伏見は報告の中で、「同討論会がどうして“Panel on low Beta Toroidal Systems”という名称になったのか」ということにも触れている。それによると、当時原研のトカマク計画は始まったばかりで、JFT-2も未だ設計段階にあった。そのため、トカマクに限定した討論会にしてしまうと、日本からの発表が少なくなってしまう。そこで範囲を拡張して、トカマクと同形式のトーラス型装置によるプラズマ閉じ込めの研究ということにして、しかし話を広げすぎないために「低ベータ値プラズマ」(俗語でいう「薄いプラズマ」)に限定する形が取られ、討論会名称が“Panel on low Beta Toroidal Systems”に決まったという。そのため、提出されたトーラス装置に関する発表は、ステラレータ、多極磁界、スフェレータ、電流多極磁界、トカマク、トーラス型ピンチと多岐にわたっていた。ところで、プラズマ研のトーラス装置 **Caulked-Cusp Pinch(CCP)**は「濃いプラズマ(高ベータプラズマ)」を生成するため、「薄いプラズマ」に限定している同討論会からすれば、本来は対象外となるはずの実験まで含まれていたことになる。しかし、森は「濃いプラズマといっても、たちまち薄くなるので」と言って、伏見の印象としては多少無理矢理に、プラズマ研の発表を討論会に組み込んだという。現に、第3回組織委打合せにおける国内論文審査の際には、プラズマ研の内田岱二郎らによる“Toroidal High-beta Plasma in a Periodic Cusp Field”という発表は選考論文内に含まれていなかった。同発表が討論会で国内発表に組み込まれていたこと、さらに伏見の報告を併せ

て考えると、内田らの発表は森の上記考えの下で、第3回打合せ後にプログラムに盛り込まれたものと推察される。

4. 本章のまとめ

本章では、核融合分野の国際会議誘致と開催に関する日本の核融合研究者コミュニティにおける動向を見てきた。1960年代前半から、日本で核融合関連の国際会議を誘致する議論が起こった。海外視察を行った長尾重夫、伏見康治によって議題に取り上げられた国際会議誘致論は、当初は電離気体現象国際会議の誘致を目的としていたが、その議論の中からプラズマ物理と制御核融合に関する国際会議の誘致論が生じた。しかし、プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議を誘致することは、日本の核融合研究の立場上、時期尚早であるとされ、1960年代に同国際会議を日本で開催することは出来なかった。その一方、1960年代後半は、日本国内での核融合研究の方針に関する議論が中心となり、国際会議誘致論は完全に先送りとされるが、1969年には再び誘致および開催の議論が起こった。

結果として、核融合研究者コミュニティの念願であった国際会議開催は、1950年代末に融特委内で議題が出されて以来、約10年後にその実現を見た。1971年に「国際的トーラス討論会」の開催が成功した背景には、「国内研究の促進が国際会議誘致には必要」という嵯峨根の叱責(1963年)が大きな影響を与えていた。これは換言すると、1960年代にかけて核融合研究者コミュニティ内で行われた国際会議誘致に関する議論が、日本の国内研究を推進する起爆剤としての役割を間接的に担ったことを意味し、さらには諸外国と日本の研究方針などの違いを認識するきっかけを与えたといえる。なお、本章冒頭で触れた第5回IAEA会議開催までの日本国内での動向については今後の調査・研究課題とする。

文献と注釈

- 1) *Proceedings of International Conference of Theoretical Physics, Kyoto & Tokyo, September, 1953, September, 1953* (Science Council of Japan, 1954).
- 2) 日本学術会議 25 年史普及版編集委員会『日本学術会議 25 年史』, 1977 年, 322-323 頁.
- 3) 武藤俊之助「国際理論物理学会議を省みての所感」, 『学術月報』第 6 巻第 7 号別冊 (1953 年), 492-498 頁.
- 4) 渡辺得之助「国際会議を迎えて」『日本物理學會誌』第 16 巻第 8 号 (1961 年), 503 頁.
- 5) 久保亮五「国際会議について」『日本物理學會誌』第 16 巻第 7 号 (1961 年), 435 頁.
- 6) 「座談会—日本で国際会議を開催する意義とその成果をめぐって—」『日本物理学会誌』第 17 巻第 5 号 (1962 年), 312-324 頁.
- 7) 溝口歌子「国際会議学入門(1)」『自然』第 22 巻第 5 号 (1967 年), 44-48 頁. / 同「国際会議学入門(2)」『自然』第 22 巻第 6 号 (1967 年), 46-50 頁. / 同「国際会議学入門(3)」『自然』第 22 巻第 7 号 (1967 年), 50-54 頁. / 同「国際会議学入門(4)」『自然』第 22 巻第 8 号 (1967 年), 50-54 頁. / 同「国際会議学入門(5)」『自然』第 22 巻第 9 号 (1967 年),

- 44-48 頁. /同「国際会議学入門(6)」『自然』第 22 卷第 10 号 (1967 年), 44-49 頁. /同「国際会議学入門(7)」『自然』第 22 卷第 11 号 (1967 年), 58-61 頁. /同「国際会議学入門(8)」『自然』第 22 卷第 12 号 (1967 年), 60-64 頁.
- 8) 狐崎晶雄, 吉川庄一『新・核融合への挑戦いよいよ核融合実験炉へ』講談社ブルーバックス, 2003 年, 201-202 頁.
- 9) *Proceedings Series Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1974, Nuclear Fusion Supplement, Vol.1-3* (Vienna: IAEA, 1975).
- 10) *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986, Nuclear Fusion, Supplement 1987, Vol.1-3* (Vienna: IAEA, 1987).
- 11) *17th Fusion Energy Conference 19-24 October 1998 Yokohama, Japan, Conference Proceedings - 2001 Edition* (Vienna: IAEA, 2001).
http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/csp_008c/fec1998/html/fec1998.htm
- 12) 吉田英俊との私信(2012 年 10 月 3 日) および小川雄一との私信(2012 年 10 月 6 日).
- 13) 松田慎三郎との私信(2012 年 9 月 26 日).
- 14) 例えば, 以下の先行研究が挙げられる.
 吉岡斉「核融合研究の本格的展開」, 中山茂他編集『[通史]日本の科学技術/4. 転形期 1970-1979』, 学陽書房, 1995 年, 193-206 頁(特に 198-199 頁).
 宮本健郎「INTOR と ITER」『プラズマ・核融合学会誌』81(8) (2005): 622-624.
 井口春和「核融合研究の停滞—巨費化の壁」, 『[新通史]日本の科学技術』第 1 巻, 原書房, 2011 年, 489-511 頁.
- 15) 日本学術会議核融合研究連絡会国際交流小委員会『核融合国際交流に関する現状分析と提案』, 1977 年.
- 16) 日本学術会議核融合研究連絡会国際交流小委員会「核融合関係国際交流の現状分析と将来への提言」『核融合研究』第 44 巻別冊その 4 (1980 年).
- 17) 「核融合の歴史を遺す座談会」—核融合研究と国際交流—, 『プラズマ・核融合学会誌』第 84 巻特集号(核融合 50 周年記念 我が国における核融合の歴史と将来展望) (2008 年), 39-52 頁. : http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2008_10b/jspf2008_10b-39.pdf
- 18) 植松英穂, 竹田辰興, 西尾成子「日本における核融合研究開発の歴史」『日本物理学会誌』第 56 巻第 6 号 (2001 年), 395-402 頁.
- 19) 川上一郎「核融合特別委員会(第 3 回)議事録」『核融合研究』第 3 巻第 2 号 (1959 年), 209-224 頁.
- 20) 早川幸男, 木村一枝「核融合研究事始め(2)」『核融合研究』第 57 巻第 5 号 (1987 年), 271-279 頁.
- 21) *Nuclear fusion : Proceedings of the Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 4-9 September 1961, Salzburg, Austria, Nuclear Fusion 1962 Supplement Part.1-3* (Vienna: IAEA, 1962-63).

- 22) *Proceedings of the Fifth International Conference on Ionization Phenomena in Gases, Munich, 28 August-1 September 1961* (North-Holland, 1962).
- 23) 本稿第4章を参照.
- 24) 「第9回運営委員会報告」『核融合研究』第10巻第2号(1963年), 172-177頁.
- 25) 寺嶋由之介「編集後記」『核融合研究』第10巻第2号(1963年), 203頁.
- 26) 伏見康治「海外の核融合研究の現状と今後の見通し」『日本原子力学会誌』第4巻第4号(1962年), 53-58頁.
- 27) 伏見康治「伏見所長の欧米通信(第10信)」『核融合研究』第8巻第2号(1962年), 141-158頁.
- 28) 「核融合特別委員会(第22回新旧合同委員会)議事録」『核融合研究』第9巻第1号(1962年), 107-110頁.
- 29) 「常任委員会報告」『核融合研究』第10巻第5号(1963年), 406-407頁.
- 30) 「第26回核融合特別委員会報告」『核融合研究』第10巻第5号(1963年), 416-424頁.
- 31) 「核融合懇談会総会報告」『核融合研究』第10巻第5号(1963年), 408-411頁.
- 32) 「第28回核融合特別委員会報告」『核融合研究』第12巻第2号(1964年), 172-189頁.
- 33) 嵯峨根遼吉記念文集出版会『嵯峨根遼吉記念文集』, 1981年, 235-252頁(第2部座談会, 核融合研究の推進).
- 34) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of a Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research held by the International Atomic Energy Agency at Culham, 6-10 September 1965*, Proceedings Series, Vol.1-2, (Vienna: IAEA, 1966).
- 35) 「核融合特別委員会報告(第27回)(新旧委員合同会議)」『核融合研究』第11巻第5号(1963年), 447-450頁.
- 36) Yu.V.Gott, M.S.Ioffe, V.G.Telkovsky, “Some new results on confinement in magnetic traps,” 前掲21), Part3 (1963): 1045-1047/English translation: 1284.
- 37) 本稿第5章を参照.
- 38) *Proceedings of the seventh International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Beograd, 22-27 August 1965* / edited by B. Perović and D. Tošić (Gradevinska Knjiga, 1966).
- 39) 「第32回融特委報告」『核融合研究』第14巻第6号(1965年), 829-836頁.
- 40) 「核融合懇談会総会報告」『核融合研究』第15巻第2号(1965年), 92-103頁.
- 41) 本稿第4章を参照. /『核融合・プラズマ研究白書』(通称, ピンク・パンフレット No.1), 核融合・プラズマ研究将来計画小委員会(委員長: 関口忠), 1965年.
- 42) 前掲2), 433頁.
- 43) *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of the third International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, held by the International Atomic Energy Agency at Novosibirsk, 1-7 August 1968*, Vol.1-2, (Vienna: IAEA, 1969).
- 44) 本稿第4章を参照. / 「原子力特別委員会核融合部会(第7期第6回)議事録」『核融合研

- 究』第 21 巻別冊 (1968 年), 75-87 頁.
- 45) M. J. Forrest, N. J. Peacock, D. C. Robinson, V. V. Sannikov, P. D. Wilcock, *Measurement of the Parameters in TOKAMAK T3-A by Thomson Scattering*, CLM-R 107 (1970).
- 46) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第 8 期第 1 回)」『核融合研究』第 24 巻別冊その 1 (1969 年), 6-16 頁.
- 47) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第 8 期第 2 回)」『核融合研究』第 24 巻別冊その 2 (1970 年), 79-96 頁.
- 48) 「M.Rabinovich→伏見康治への書簡」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:002-29-13).
- 49) 「拡大幹事会メモ」『核融合研究』第 25 巻第 5 号 (1970 年), 285-286 頁.
- 50) 「原子力特別委員会核融合部(第 8 期第 4 回)議事録」『核融合研究』第 25 巻第 5 号 (1970 年), 273-286 頁.
- 51) 「第 1 回国際討論会組織委員会打合せ議事録」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-06).
- 52) 「第 49 回運営委員会報告」『核融合研究』第 25 巻第 5 号 (1970 年), 287-296 頁.
- 53) 「第 2 回国際討論会組織委員会打合せ議事録」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-08).
- 54) 「国際的トーラス討論会論文および出席希望募集案内」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-17).
- 55) 「第 3 回組織員会議事予定(案)」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-18).
- 56) 「R.W.Gould→森茂宛書簡」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-16).
- 57) 「G.von Gierke→宗像英二宛書簡」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-15).
- 58) 「Fontenay-aux-Roses 研究所→宗像英二宛書簡」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-10).
- 59) 「森茂→山本賢三宛書簡(45.10.10)」, JAEA 那珂核融合研究所山本賢三史料(ID:101-03).
- 60) 「宗像英二→L.A.Artsimovich 宛書簡」, JAEA 那珂核融合研究所山本賢三史料(ID:101-03).
- 61) 「伏見康治→A.Petorosyants 宛書簡」, JAEA 那珂核融合研究所山本賢三史料(ID:101-03).
- 62) 「吉川庄一→森茂宛書簡」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-09).
- 63) 「L.A.Artsimovich→M.B.Gottlieb 宛書簡」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-09).
- 64) 本書簡では, 吉川(Yoshikawa)が Ioshikawa, Shafranov が Shasranov と誤記されている.
- 65) 「国際的トーラス討論会国内応募論文リスト 45.12.17(第 3 回組織委)」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-18).

- 66) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第8期第5回)」『核融合研究』第26巻別冊その1 (1971年), 3-43頁.
- 67) 「原子力特別委員会核融合部会議事録(第8期第6回)」『核融合研究』第26巻別冊その2 (1971年), 1-14頁.
- 68) 「核融合懇談会総会議事録」『核融合研究』第26巻別冊その1 (1971年), 44-48頁.
- 69) 「森茂→寺嶋由之介宛書簡(45.12.23)」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-19).
- 70) 「原子力特別委員会核融合部第8期第7回(新旧合同部会)」『核融合研究』第26巻別冊その3 (1971年), 95-101頁.
- 71) 「国際的トーラス討論会のご案内」, ファイル「国際的研究会 低ベータトーラス 1971」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID:026-13-18).
- 72) 「森茂→山本賢三宛書簡(46.1.9)」, JAEA 那珂核融合研究所山本賢三史料(ID101-03).
- 73) 例えば, 日本原子力新聞, 朝日新聞, 科学新聞, 読売新聞, 毎日新聞等に国際的トーラス討論会の開催記事が掲載された.
- 74) 「核融合反応 実現への道—その現状と問題点—」『週刊新潮』1971年2月20日号, 25頁.
- 75) 森茂「国際的トーラス討論会に参加して」『日本原子力学会誌』第13巻第5号 (1971年), 298-299頁.
- 76) 伏見康治「小さな核融合研究国際パネル」『中原懇情報』別冊 (1971年), 3-8頁.
- 77) 「核融合国際会議東京で開催—世界の頭脳を集めて—」『原研』(1971年), 1-7頁.
- 78) 「(付録1) 核融合国際討論会の成果」, 『核融合のはなし 日本原子力研究所』[広報], JAEA 那珂核融合研究所山本賢三史料(ID:101-03).
- 79) 船橋昭昌, 伊藤智之「国際的トーラス討論会に出席して」科学新聞(昭和46年2月26日付), JAEA 那珂核融合研究所山本賢三史料(ID:101-03).
- 80) 「M.ラビノーヴィッチ氏よりの書簡」『核融合研究』第26巻別冊その2 (1971年), 113頁.

第7章 米国ジェネラル・アトミックの大河千弘グループにおける内部導体系装置でのプラズマ閉じ込め研究のはじまりと展開

1. 本章の背景と目的

1950年代、「核融合反応を利用したエネルギー源の確立は、早々に実現可能である」という楽観的な考え方のもと、米国やソ連、英国などでミラー装置やステラレータ(Stellarator)など多種多様な磁場配位を持つ装置が建設され、秘密裏に核融合研究が開始された。ところが、当初の予想に反して、どの装置も磁場中にプラズマを閉じ込めた際に生じるボーム(Bohm)拡散などの不安定性に悩まされ、「エネルギー源としての核融合炉の実現」はその研究開始直後から暗礁に乗り上げることになる。このような状況を打開するために考案されたものの一つに、内部導体系装置があった。

内部導体系装置とは、容器のなかに設置された導体に通電させることで多極(マルチポール)磁場を形成し、安定なプラズマ閉じ込めを実現するように工夫された実験装置である¹⁾。特に、内部導体系軸対称トーラス装置はプラズマの磁気流体力学(MHD)的不安定性や微視的不安定性に安定な平均極小磁場配位を構築できるため、1960年代には米国やドイツなどで研究が盛んに行われた。

その中でも、米国ジェネラル・アトミック(General Atomic, GA社)の大河千弘とプリンストン大学プラズマ物理学研究所(Princeton Plasma Physics Laboratory, PPPL)の吉川庄一は、内部導体系装置の研究で成果を挙げた日本人研究者として知られている。彼らはそれぞれの所属機関で早くから研究を指揮する立場となり、核融合研究の進展に大きく寄与した。彼らの活躍は国際会議の席上でも顕著で、同席した伏見康治によると、USAと書かれたネームプレートを掲げた日本人がしきりに質問をする光景が話題になっていたという²⁾。

そして、1965年9月に開催された国際原子力機関(IAEA)主催の第2回プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議(International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 以下IAEA会議)で、大河たちによって発表されたトロイダル・オクトポール(Toroidal Octopole : 八極磁場)による水素プラズマの閉じ込め実験は、主だった不安定性をとまわずにプラズマを閉じ込めた結果が高く評価された。そのため、内部導体系軸対称トーラス装置は「大河トーラス(Ohkawa Torus)」とも称されている。

他方、大河による内部導体系装置の研究は日本の核融合研究にも少なからず影響を与えたとされている。例えば、1969年7月に原子力委員会が策定した「核融合研究開発基本計画」³⁾に基づき、日本原子力研究所(原研、現在の日本原子力研究開発機構の前身機関の一つ)で建設された装置JFT-1は、ヘキサポール(Hexapole : 六極磁場)配位を有する内部導体系装置であった。同装置の具体的な検討には大河の意見も多大に影響していたようで⁴⁾、当時原研で核融合部門を束ねていた森茂によれば、内部導体系装置は実験と理論が初めて見事に一致し、国内でのプロジェクト研究を出発させる重要な契機になったという⁵⁾。これは換言するに、大河のGA社における内部導体系装置の研究が、1960年代後半に閉じ込め研究へ

と方針転換を図ろうとしていた日本の核融合研究に一つのきっかけをもたらしたといえ、現在では世界の核融合研究を先導する国内での研究体制の構築に大きな影響を与えたと評価できるだろう。

大河による内部導体系装置の研究成果について、核融合研究開発史に関する先行研究での取り扱いを見てみると、例えば、植松英穂らは

・・・1965年の第2回IAEA会議(Culham会議)の段階ではプラズマ不安定性についての理解も進み核融合研究にも徐々に見通しが開け始めたということがあった。具体的には、ヨッフエ磁場によるミラー装置の極小磁場配位及びトーラス型マルチポール装置(大河トーラス)による平均極小磁場配位によるプラズマ安定化の実証であり、英国Culhamからの帰途には多くの日本人研究者がSan Diegoの大河千弘(General Atomic社)のもとを訪れている。・・・⁶⁾

と述べ、大河の実験は平均極小磁場を持つトーラス装置が、ボーム時間(ボーム拡散係数から予言される閉じ込め時間)を超えるプラズマ閉じ込め時間を実現したことで、後のトカマク(Tokamak)装置の全盛に向かうきっかけになったと評している⁷⁾。また、吉岡斉も

この時期[本稿筆者注：1960年代]におけるプラズマ閉込め研究の前進に、日本の研究機関は何も貢献しなかったが、2人の在米日本人研究者が目立った活躍をみせた。大河千弘(ガルフ・ゼネラル・アトミック社)と吉川庄一(プリンストン大学プラズマ物理研究所)の両氏である。両氏はそれぞれ独創的アイデアに基づくトーラス型核融合装置を開発し、プラズマ閉込めに優れた成果を収めた。・・・⁸⁾

として、大河らの研究を「核融合研究黎明期」と称される1960年代における日本人の顕著な成果と評価している。このほか、ブラームスC.M. BraamsとスコットP.E. Scottは磁場閉じ込め装置の歴史に関する著書の中で、1960年代の「大河トーラス」を含む内部導体系装置について、核融合炉としての候補者にはなり得ないが、トーラス装置に関する輸送や安定性の理論を検証するために、回転変換やシア、磁気井戸を調整できる点を長所として挙げ、特に1968年の第3回IAEA会議までに「ボーム拡散の一般的な特徴に反する数多くの証拠」を提示した点について称賛している⁹⁾。また、ブロンバーグJ.L. Brombergも1965年頃の内部導体系装置は「非科学者でも容易に理解できる新しい進展」をもたらし、同装置による閉じ込め時間の印象的な向上は、ボーム拡散が「トロイダル閉じ込めの避けられない特性ではないことを示した」と述べている¹⁰⁾。

しかしこれらは、あくまでも核融合研究開発史を概観した上での評価であるといえる。つまり、先行研究では磁場閉じ込め研究における一里塚として、当時問題とされていたボーム拡散を超えるプラズマ閉じ込め時間を内部導体系装置が提示した点のみを評価の対象としている。そのため、例えば、大河がどのような考えのもとに内部導体系装置での研究を開始したのか、またその関心の推移や研究方針の変遷などには一切の言及がなされて来ない。唯一、ブロンバーグの著書にのみGA社で内部導体系装置が開始された背景について、大河らへのインタビューを踏まえた記述があるが、それも十分であるとはいえない。以上を

踏まえて、本章では GA 社での 1960 年代における内部導体系装置でのプラズマ閉じ込め研究のはじまりと変遷について、特に研究を先導した大河の取組みと見解を明らかにすることで、内部導体系装置の研究が核融合研究開発史の中で果たした役割について再考することを目的とする。

2. GA 社での内部導体系装置によるプラズマ閉じ込め研究のはじまり

上述したとおり、第 2 回 IAEA 会議での大河の発表は核融合研究開発史のなかで一定の評価が与えられているが、その研究の変遷については詳細に言及されて来ていない。本節では、GA 社でのプラズマ閉じ込め研究の開始から第 2 回 IAEA 会議までの核融合研究開発史をたどり、大河らのグループが内部導体系装置の研究を開始した背景と同研究に対する当時の評価を検証する。

2.1 GA 社での核融合研究の開始と大河の参加

GA 社での核融合研究は 1957 年頃から本格的に始まり、当初はテキサス原子力研究財団 (Texas Atomic Energy Research Foundation) との共同研究として「ピンチ効果によるトーラスでのプラズマ閉じ込め研究」が遂行されていた¹¹⁾。1959 年 6 月 25 日に GA 社のジョン・ホプキンス (John Hopkins) 研究所が開所した時、核融合部門の理論グループにおける実質的なリーダーを務めていたローゼンブルース M.N. Rosenbluth と上記共同研究の実験を指揮していたカースト D.W. Kerst は、招待されたボーア N. Bohr や湯川秀樹らを前に、ローゼンブルースがプラズマの MHD 不安定性や二流体不安定性を、カーストが GA 社でのトロイダル・ピンチ放電実験の現状をそれぞれ報告している¹²⁾。

他方、大河千弘は 1950 年に東京大学を卒業した後、同大で博士号を取得し、宮本梧楼研究室の助手として原子核物理や加速器の研究に従事していた¹³⁾。これらの研究の一環として CERN (欧州原子核研究機構) や米国へ留学した際に、大河は世界で始まった核融合反応の平和利用を知り、宮本研への書簡の中で欧州諸国における核融合研究の現状を報告している¹⁴⁾。そして、加速器に関する研究書簡のやりとりを通して、カーストと親交を持った大河は、彼からの招待を受けて、1960 年から GA 社に所属することになった¹⁵⁾。

テキサス原子力研究財団との共同研究には GA 社所属の研究者や技術者の多くが参画しており、GA 社に所属した直後の大河もトロイダル・ピンチの実験に加わり、非円形断面トロイダル・ピンチに関する所内研究レポートを書いたりもしていた¹⁶⁾。ところが、研究を進める中で、ローゼンブルースら理論グループはトロイダル・ピンチの不安定性を指摘すると同時に、ミラー磁場によるプラズマ閉じ込めの実験に関心を持ち、ポスト R.F. Post らローレンス放射線研究所 (LRL) のグループとの繋がりを強めていった¹⁷⁾。このことをきっかけとして、カーストを中心とする実験グループもトロイダル・ピンチ以外の装置に対する検証作業に取りかかった。

2.2 カーストと大河による内部導体系装置の検証

内部導体系装置によるプラズマ閉じ込めは、1950年代にはカドムツェフ B. B. Kadomtsev やグラッド H. Grad らによって研究され始めていた¹⁸⁾。そのなかでも、タック J. L. Tuck の提案は大河とカーストに一つのアイデアを与える契機となる。1960年9月、タックは装置からのプラズマ漏出を防ぐために、“caulked picket fence” というらせん状の導線を挿入した装置でのプラズマの安定性に関する分析を雑誌 *Nature* に発表した¹⁹⁾。同装置は1958年に第2回原子力平和利用国際会議(The Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy)で提示されたカスプ磁場の欠点を補ったもので、プラズマ中に置かれたソレノイドコイルと picket fence コイルを用いて、カスプ磁場の磁力線を結合することにより、磁力線に沿って逃げるプラズマを防ぐ工夫が施されていた。カーストと大河は、タックが提案した“caulked picket fence” に注目し、タックのアイデアでは必ずしも安定とは言えず、さらに構造を簡素化できるとして、加速器での収斂の考え方を応用するという観点から、内部導体の配置をらせん状から直線状に改めて、プラズマの平衡と安定性を次のように論じた。

装置内部に円周に沿ってロッド(内部導体)を配置し、花卉型の磁力線を形成させる。そうすると、ロッドとロッドの間の領域 I では、磁力線によってプラズマ面が凹となってプラズマが安定に閉じ込められるが、ロッドの外側の領域 II ではプラズマ面が外側に向かって凸面になることから不安定となる。このままでは装置内に安定領域と不安定領域が混在することになるが、領域 II の磁場を領域 I よりも強く作ることによって、領域 II の不安定性を小さくすることが出来る。これによって、装置内にプラズマを安定して閉じ込めることが可能となる²⁰⁾。

なお、同配位に関して MHD 近似のもとで安定化条件を考慮すると、一般的なプラズマ閉じ込め時間は、

$$\tau = 10^{-7} T^{\frac{3}{2}} d^2 (B_2^2 / B_1^2)$$

となる²⁰⁾。ここで、 T はプラズマ温度、 $2d$ は装置の壁と内部導体の間の距離、 B_1 と B_2 はそれぞれ内部導体周辺の磁場と磁力線に沿った磁場の最小値を表す。大河とカーストは上記の閉じ込め時間を踏まえて、同装置では「プラズマに影響する他の損失過程に対する時間(プラズマが不安定性などによって損失する時間)」と比較して、長時間のプラズマ閉じ込めが可能であると論じた。また、彼らは装置内に内部導体を保持するための支持棒が存在しても、十分に長い閉じ込め時間が実現できるとしている。例えば、長さ L 、幅 W 、 $2m$ 本の内部導体がある場合、熱速度 $v_{TH}/\sqrt{3}$ を持つプラズマが N 個あったとすると、プラズマの支持棒による損失時間は

$$\tau_L \approx \sqrt{3} \pi R^2 L \cdot 10^{-6} / 4mWdT_i^{\frac{1}{2}}$$

と求まる。なお、 R はマルチポール機構の半径で、 T_i はイオン温度である。大河とカーストはプラズマを装置中に閉じ込めておくという観点では、この損失時間についても、既存の装

置としては十分に長い時間であると評価した²¹⁾。さらに、大河は想定される装置において、プラズマ温度 10^4eV の場合で、閉じ込め時間は約 10^{-2}sec 程度になると算出した²¹⁾。

しかし、この計算結果を発表した 1961 年 11 月のアメリカ物理学会(APS)の 1961 Autumn Meeting of the Division of Plasma Physics(開催場所：Colorado Springs)²²⁾では、装置を 2 次元空間で議論していることやトーラス状にした場合を考慮しておらず、内部導体を無限長として計算を行っていることから、同装置によるプラズマ閉じ込めの可能性が疑問視され、会場にいた伏見康治の報告には「あまり注目を浴びなかった」と記されている²³⁾。この時は、後に同じ内部導体系装置スフェレータ(Spherator)での実験を行う吉川庄一でさえ、大河らの提案には懐疑的であったという²³⁾。しかし、カーストや大河は同装置によるプラズマ閉じ込めの有効性に対して、かなりの自信を持っていたようで、カーストは内部導体系トーラス装置がステラレータ磁場やカスプ磁場よりも単純な磁場配位を有し、今後の活発な研究を予期するものであるとの見解を American Power Conference(1962 年, the Illinois Institute of Technology, Chicago で開催)での講演で力説している²⁴⁾。

2.3 カーストの転出と直線状内部導体系装置の実験開始

ところが、内部導体系装置での実験を開始するのと時を同じくして、GA 社の核融合研究グループには大きな変化があった。理論グループとの論争やトロイダル・ピンチ計画の終了にともない、1962 年にカーストが母校であるウィスコンシン(Wisconsin)大学へ転出してしまったのである²⁵⁾。大河によると、カーストはトロイダル・ピンチの接合部分での磁場の誤差を重視して装置を設計することを強調していたが、理論グループはプラズマの不安定性を指摘するばかりで、両者のあいだではかなり激しい論争になっていた。その結果、トロイダル・ピンチ計画の今後に関して結論を出さなければならなくなった段階で、カーストは大河宅を訪れ、「ウィスコンシンに行く」と言って GA 社を出て行ったという²⁶⁾。カーストの転出にともない、GA 社での大河の地位と責任はさらに大きくなり、彼を中心として内部導体系装置に関するプラズマ閉じ込めの研究グループが本格的に組織されることになった。他方、これに関連してか、1963 年には東大宮本研の後輩であった吉川允二が GA 社に入社する。吉川は将来性を買った米国原子力委員会(AEC)から招聘を受けて渡米したというが、実際には大河が吉川を呼び、さらに上層部との掛け合いにより、かなり高待遇で GA 社所属になったという²⁷⁾。

大河のグループは、先ず小型サイズの直線状オクトポール装置(linear Octopole)の建設に取り掛かり、1963 年に実験成果を発表した²⁸⁾。同装置は、内部導体 4 本に同方向の電流を流してオクトポール磁場を生成し、装置左側面よりエネルギー約 2keV 、密度 $10^{17}/\text{cm}^3$ の水素プラズマを装置中央部にある零磁場の地点に向けて、プラズマ・ガンから入射させるという機構になっている。4 本の内部導体によって形成されるオクトポール磁場は軸対称分布となり、磁場と磁束関数 ψ は次のような関係になる。

$$B_r = \frac{\partial \psi}{r \partial \theta}, \quad B_\theta = -\frac{\partial \psi}{\partial r}$$

$$\psi = \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi}\right) \ln\left[1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^8 - 2\left(\frac{r}{r_0}\right)^4 \cos 4\theta\right]$$

ここで、 r_0 は軸から内部導体までの距離、 I は各導体中を流れる電流値、 μ_0 は真空の透磁率を示す²⁸⁾。また、実験の目的が「装置内に形成された多極磁場にプラズマを注入した際のふるまいを調べること」であったために、同装置にはプラズマを閉じこめるための具体的な対策は講じられていない。実験では、磁気プローブや静電プローブ、カーセル(Kerr cell)カメラ等を用いた測定と観測が行われ、装置内に注入されたプラズマは入射口付近の磁場を通過し、反対側の磁場に達して静止した後、内部導体系装置の軸に沿って拡がり、装置の末端壁に達することが確認された。この実験の結果を受けて、大河らは内部導体系装置にプラズマを入射することは容易であると結論している。なお、いきなりトーラス装置を造らず、小型の直線状装置で実験を行った経緯には、GA社内での理論グループとの関係があった。大河によると、当時、ローゼンブルースらは内部導体系装置に対して懐疑的な見方を持っていたため、トーラス装置を造る前に直線状装置でプラズマ入射の実験を行い、多極磁場による実験計画を理論グループに承認させる目的があったという²⁹⁾。

この後、大河と一緒に直線状装置の研究に従事していたヴォーヒーズ H. G. Voorhies やドゥースターホフト W. C. Duesterhoeft らは、先の実験で考慮されていなかった閉じ込め時間の向上をはかるために、さまざまなコイルを用いたプラズマの端損失防止を試みた³⁰⁾。特に、ヴォーヒーズはオクトポール磁場とミラー磁場を組み合わせた複合磁場中へのプラズマ入射実験を行っている。しかし、1964年6月のAPS 1964 Summer Meeting (開催場所：Denver, Colorado)での発表アブストラクトによると、プラズマ・ガンから複合磁場内部へ入射したプラズマの大部分は、ミラー端部を通して軸方向に逃げてしまい、閉じ込め時間の向上は成功しなかったようである³¹⁾。つまり、結果として端損失を防げず、直線状装置での長時間のプラズマ閉じ込めは困難であることが明らかとなった。

2.4 トロイダル・オクトポールの実験と第2回IAEA会議での発表

直線状装置の結果を踏まえて、大河やシュップ A. A. Schupp, 吉川, ヴォーヒーズらは、同軸プラズマ・ガン入射によるトロイダル・オクトポールでのプラズマ閉じ込め実験を開始した。トロイダル・オクトポールは4本の内部導体中に流れる電流と装置の壁を流れる帰還電流によってオクトポール磁場を生成することで、同軸プラズマ・ガンから装置側面に入射するプラズマがMHD安定性を満たすように設計された。1964年11月に開催されたAPSのAnnual Meeting of the Division of Plasma Physics(開催場所：New York)では、シュップが装置の設計と構造に関する発表³²⁾を行い、初動実験として同装置へ入射されたプラズマのふるまいが大河によって報告された³³⁾。発表された実験結果によると、入射された初期密度 $10^{13}/\text{cc}$ の水素プラズマは $300\mu\text{s}$ の平均寿命(e-folding time)で減衰した。また、電子温度は約

30 μ sで 10eV から 5eV まで減少し、イオンエネルギーはこれよりもさらに急激に減衰することが示された。なお、トロイダル・オクトポールに設置された同軸プラズマ・ガンは GA 社の技術者であったベル(D. Bell)とシュップ、大河らによって設計されたもので³⁴⁾、同プラズマ・ガンを使用した直線マルチポール磁場への入射実験³⁴⁾および発生する水素プラズマのエネルギースペクトルやプラズマ流の測定も、ヴォーヒーズと大河によって行われている³⁵⁾。

そして本章冒頭でも挙げたように、1965 年 9 月、英国カラム(Culham)研究所で開かれた第 2 回 IAEA 会議で、大河らはトロイダル・オクトポール実験でのさらに詳細な分析結果を発表した³⁶⁾。トロイダル・オクトポール装置はアスペクト比 5、主半径 63.5cm、内部導体間の距離 25cm で、上記の同軸プラズマ・ガンから水素プラズマを打ちこむ形式が取られた。4 本の内部導体は直径 0.64cm の支持棒によって容器内に配置されており、壁面を流れる帰還電流と併せてオクトポール磁場を生成する。実験では、同軸プラズマ・ガンで生成された平均エネルギー100eV、約 10^{18} 個の水素プラズマが、拡散チャンバー中に配置されたガイド磁場(guide field)としての役割を担うソレノイドコイルを通過することによって中性粒子が除去され、オクトポール磁場に入射する。そして、入射したプラズマは約 100 μ s で静かになり、密度が装置内で一樣になる様子が確認された。一方、ラングミュア(Langmuir)探針による測定は、イオン温度 100eV のプラズマを入射させた場合、オクトポール軸上の初期プラズマ密度が約 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ で、これが入射後に約 1ms の時定数で減衰することや、その間の電子温度が約 10eV でほぼ一定であることを示した。この時、密度のゆっくりとした減衰の原因は「支持棒によるプラズマ損失」であると評価された。他方、エネルギースペクトルの計測から、プラズマ中の高エネルギーイオンは装置の壁表面で生成される中性粒子との荷電交換反応のために急速に失われ、低密度($\sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$)でプラズマを入射した場合には、イオンが支持棒によって冷却される可能性を提示した。また、電気的および磁気的変動は探針からの測定では確認されず、ポテンシャルと密度の擾乱がわずかに観測されるのみであった($e\Delta\Phi/kT_e \sim \Delta n/n \sim 1\%$)。

ところで、内部導体系装置の実験は、既に同時期には世界各地で行われており、第 2 回 IAEA 会議でも大河ら GA 社に加えて、LRL のファース H. P. Furth らが装置レビトロン(Levitron)による「シアの安定化」に関する検証³⁷⁾を、またゲーリケ G. von Gierke らマックス・プランク(Max-Planck)研究所のグループがヴェンデルシュタイン(Wendelstein)-I(ステラレータ磁場)とオクトポール装置でのセシウムプラズマの閉じ込め実験の比較結果³⁸⁾を発表している。その中でも、ゲーリケらの実験は大河の成果と並んで高く評価された。例えば、カラム研究所のビッカートン R. J. Bickerton は同会議の報告書で、「ドイツのセシウムプラズマ実験はボーム時間の 5~10 倍の閉じ込め時間を示したが、他の環状系はボーム時間程度であった」として、ゲーリケらの成果を特記している³⁹⁾。まだその実験結果に疑いの目が向けられていたソ連のトカマク装置 T-3 などを除いて、ボーム拡散の抑止効果が実験的に証明され、ボーム時間を越える閉じ込め時間を示した内部導体系装置の成果が目立ったことは、当時の時代背景を表しているといえる。他方、大河らの成果も目立った不安定性をと

もなわず、安定に水素プラズマを閉じ込めることを示したために、同会議のサマリーを担当したスピッツァーL. Spitzerは「核融合研究における重要な一里塚である」と称賛し⁴⁰⁾、会議に出席していた森茂も「本会議の金メダル」と評している⁴¹⁾。しかし、会議後の1965年12月にまとめられたアリソンS. K. AllisonらAEC米国8人委員会(制御熱核融合反応研究についての調査委員会)の報告書では、「GA社における理論的研究は国の内外を問わずCTR計画に重要な役割を果たしている」とあるのみで、AECの計画ではなかったためか、第2回IAEA会議での大河らの発表には一切触れられていなかった⁴²⁾。このように、一部にはAECのような例もあったが、総じて見れば、大河らのトロイダル・オクトポールの実験成果は第2回IAEA会議直後から高く評価されていたことがうかがえる。

3. トロイダル・オクトポール研究

第2回IAEA会議後、大河たちはトロイダル・オクトポール中での不安定性に焦点を絞って、さらなる研究を開始する。前述した通り、トロイダル・オクトポールでは巨視的なMHD不安定性が制御され、プラズマを安定に閉じ込めることに成功した。そこで、彼らは「ドリフト波とサイクロトロン波のあいだでの共鳴によって生じると理論的に予言された微視的不安定性の同定と制御」という次の段階へと研究を進めている。なお、もともと多極磁場は微視的不安定性、特にドリフト不安定性に対してもかなり安定であった。なぜならば、多極磁場の磁力線はそれ自体で閉じていて、しかも磁力線の長さが比較的短いためである⁴³⁾。一般に、ドリフト不安定波の磁場に平行な波長 λ_{\parallel} は磁力線の長さを L とすると、 $\lambda_{\parallel} \sim L$ という関係にあるため、 L を十分短くすることでドリフト不安定性の安定化を図れることになる⁴⁴⁾。以上を踏まえて、本節では第2回IAEA会議以降のGA社におけるトロイダル・オクトポール装置を用いた大河らによる不安定性の研究を概観する。

3.1 トロイダル・オクトポールでの微視的不安定性の確認と制御の試み

大河らは1965年以降、プラズマ中で確認された浮動ポテンシャルの擾乱を電気ダブル・プローブによって観測し、ノイズの周波数と振幅を位置、磁場、イオン温度、イオン密度の関数として測定することから、波の分散関係に基づく不安定性の同定を試みている。その結果、観測されたノイズは線形理論から予言されたドリフトサイクロトロン不安定性の主要な特徴と一致することが確認された⁴⁵⁾。

これ以降、大河らはマルチポール磁場やプラズマ圧力、プラズマ密度を変化させたことによる不安定性の観測に加えて、「トロイダル磁場の付加にともなう磁気シアの効果」、さらには「支持棒による荷電交換」と「ダイポール磁場による支持棒の遮蔽効果」の検証といった「トロイダル・オクトポールにおける微視的不安定性の制御」にも関心を向けている⁴⁶⁾。そのために、既存のトロイダル・オクトポールは真空容器を覆うように巻かれたコイルによってトロイダル磁場を付加できるように改造されたほか、プラズマがオクトポール磁場に入射する時、注入ポート付近で生じる冷たいガス(中性粒子)を減少させるために、改良を加え

た新しいインジェクターコイル(Model II)の取り付けが行われた⁴⁷⁾。さらに、新たに作られた中性粒子のアナライザーや、ウィスコンシン大学のカーストラによって開発されたイオンのエクストラクターチューブ(extractor tube)が、パラメータの計測に使用されることになった⁴⁸⁾。

大河らの見解では、これまでのオクトポールの閉じ込め時間は微視的不安定性を研究するには未だ十分に長くないと考えられていた⁴⁹⁾。そのため、彼らは「装置の壁における荷電交換効果」と「支持棒損失」による閉じ込め時間への制限を改善しようと試みている。引き続き行われたトロイダル・オクトポールの実験では、プラズマ密度が 10^{11}cm^{-3} 以上の場合、閉じ込め時間は入射ポートの内側もしくはポート周辺で装置壁から解放された中性粒子との荷電交換反応によって制限されるが、インジェクターコイル(Model II)を装着することで、高エネルギー中性粒子数を減少させることに成功した。これに対して、プラズマ密度が 10^{11}cm^{-3} 以下の場合、中性粒子は閉じ込め時間にはほとんど影響を与えず、内部導体の支持棒による制限が支配的となった。それは、既存の支持棒の 50%の表面積を持つ追加の支持棒を挿入することによって確認され、測定されたイオンの閉じ込め時間が支持棒損失に比例して、2 倍以内で説明できることが示された⁵⁰⁾。なお、密度が 10^{11}cm^{-3} 以下の場合でも、プラズマ・ガンから多量の高エネルギー中性粒子が発生するが、プラズマ・ガンからの中性粒子の存在は深刻な影響を与えないことが、プラズマ流の中にディスクを配置することで中性粒子をトラス内に入射させない実験によって認められている⁵¹⁾。そして、閉じ込められたプラズマの密度と体積から見積もられるイオンの生存時間は、支持棒損失の時間⁵²⁾

$$\tau_s = \alpha \left(\frac{V}{Sv_s} \right)$$

から約 1ms と評価され、この値は支持棒にぶつかるイオン流束を測定した実測値とも良い一致を示した(α は定数、 v_s はイオンの音速、 V はプラズマ体積、 S は支持棒の磁力線を横切る部分の面積)。

他方、閉じ込め時間を制限するほどではないが、それでもオクトポール中で観測される擾乱をさらに抑えることを目的として、トロイダル磁場の付加による磁気シア効果の確認作業が行われた。その結果、数 G のトロイダル磁場を付加することで擾乱はさらに軽減されたが、これによって閉じ込め時間を向上させるには至らなかった⁵³⁾。なお、この時にはボーム拡散係数から予言される閉じ込め時間よりも 10 倍以上長い閉じ込め時間になることが確かめられている⁵³⁾。

また、支持棒を局所的な磁場によってプラズマから遮蔽すれば、支持棒損失を抑えて閉じ込め時間の改良が可能になるとして、ヘアピンコイルによるダイポール磁場での支持棒の遮蔽効果についても検証が行われている⁵⁴⁾。実験では、ダイポール磁場の付加による閉じ込め時間の向上までは評価できなかったが、コイル付近に形成される零磁場とコイルのあいだの単位長さあたりの磁束の差がイオンの運動量よりも大きくなる場合に、十分な遮蔽効果が観測された。

3.2 第3回 IAEA 会議での不安定性に関する発表

その後、1968年8月にソ連ノボシビルスク(Novosibirsk)で開催された第3回 IAEA 会議における発表で、大河らはトロイダル・オクトポール中で観測された3つの不安定性に言及した⁵⁵⁾。同発表は、「磁気井戸、磁気シア、連結距離というパラメータのうち、磁気井戸の深さと連結距離の長さを変えたクアドルポール(Quadrupole：四極磁場)とオクトポールという2つの配位で、トロイダル磁場の付加による磁気シアの効果も含めて、プラズマの不安定性に関する比較を行った」というもので、両配位でのプラズマパラメータを同一の条件($n \sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$, $T_i \sim 100 \text{eV}$, $T_e \sim 10 \text{eV}$)に設定し、観測された不安定性について同定した結果が報告された。なお、同発表を行う直前の1967年にGA社はガルフ・オイル社(Gulf Oil Corp.)に買収され、Gulf General Atomic(GGA社)に改組されている⁵⁶⁾。

実験の結果、オクトポールで観測された擾乱のレベルは1%以下とわずかであったが、磁場を半減させると、擾乱レベルがほぼ10倍にまで増加した。また、プラズマ密度がマルチポール軸上で 10^{10}cm^{-3} 以上の場合にも、同じ性質を持つ擾乱が観測されている。これは先に検証されたドリフトサイクロトロン不安定性と同じもので、大河はこの擾乱をMode Iと称した。Mode Iの特徴としては、プラズマ密度、イオン温度、そしてトロイダル磁場のようなパラメータに依存性を持ち、10G以上のトロイダル磁場を付加すると、検出されなくなったという。これらの特徴を踏まえて、大河はクラール N. A. Krall やフォウラー T. K. Fowler, バドラ D. K. Bhadra らによる理論解析の結果と実験データを比較して、Mode Iをドリフトサイクロトロン不安定性と同定している。

一方、 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ より低い密度下で、数十Gのトロイダル磁場を付加した際に、Mode IIと大河が称したMode Iとは異なる擾乱が観測された。このMode IIは、ユニバーサルドリフト不安定性を示唆する「電子の反磁性ドリフトの方向への伝播」と「有限な磁場に平行方向の波数 k_{\parallel} の存在」を示し、イオン温度の低下にともなって消失していることから、大河は分散方程式との関係も踏まえて、Mode IIを電子駆動型のドリフトサイクロトロン不安定性であると結論した。

さらに、 $2 \times 10^{-6} \text{Torr}$ 以上の圧力、 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ 以下のプラズマ密度で観測される擾乱Mode IIIの存在も確認された。実験の結果、Mode IIIの振幅は $1 \times 10^{-5} \text{Torr}$ の圧力で最大値をとり、同圧力下で100eVイオンの生存時間は約100 μs であった。そして、理論的に提示された交換型不安定性の原因のうち、「磁力線に沿ったイオンバウンシング周波数とドリフト波周波数の共鳴」、また「磁力線に沿った曲率変調の効果」がMode IIIの性質と一致することが認められた。

このように、トロイダル・オクトポールにおける不安定性の同定作業では、実験結果の理論的解析が困難な状況にあった当時においても、実験と理論がよく一致し、完全な定量的結論には至らなかったが、ドリフトサイクロトロン不安定性などの存在を確認している。なお、大河らは以上の議論を踏まえて、これらの不安定性はプラズマ損失の主因にはなっておらず、オクトポール配位の深い磁気井戸がその効用をもたらしていると結論した。

4. トロイダル・クアドルポール研究

前節でも述べたように、第3回 IAEA 会議において大河は、オクトポールと比較するかたちでクアドルポールの実験結果についても報告している。大河らによるクアドルポールの実験は、第2回 IAEA 会議でのオクトポールに関する発表と比較すると、先行研究において全くと言って良いほど触れられておらず、大河らが何故クアドルポールの研究を行なっていたのかという点も評価されていない。本節では、GA(GGA)社での大河グループによるトロイダル・クアドルポールを用いた核融合研究に関して、その詳細に言及したい。

4.1 クアドルポールへの装置改造と観測された不安定性

大河らがトロイダル・オクトポールの実験と併行して、別の配位であるクアドルポールを研究対象として取り上げたのは、第2回 IAEA 会議直後からであったと考えられる。1966年11月の APS Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (開催場所: Boston, Massachusetts) では、シュップらによって低アスペクト比でのトロイダル・クアドルポールの設計に関する考察結果が発表され、クアドルポール電流と帰還電流とを考慮した磁場配位およびアスペクト比に基づく MHD 不安定性に関する検討が加えられている⁵⁷⁾。既存のトロイダル・オクトポールの内部導体を4本から2本に減らすという改造を行なったトロイダル・クアドルポールの実験では、ラングミュア探針などの診断方法や、プラズマ源としてプラズマ・ガンを利用する点はオクトポールの場合と同じだが、プラズマを入射する地点が装置側面から装置上部に変更された。これは、零磁場となる中心地点に向けて、プラズマを入射するように工夫された結果である。なお、120G以上のトロイダル磁場が付加できるようにトロイダル・ワインディング(巻線)が設置されている点もオクトポールから変更されていない。トラス中のプラズマ密度は、ガイド磁場を変化させることによって、 $10^7\text{cm}^{-3}\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ の範囲で調整することが可能で、プラズマ・ガンから入射される100eVの水素プラズマにおいて、入射時のイオンと電子の温度はそれぞれ約50eVと約6eVであった。

装置の改造直後に行われた予備実験⁵⁸⁾において、クアドルポールはオクトポールの実験では観測されなかった巨大な振幅を持つ擾乱($\Delta n/n\sim 40\%$)が、磁束関数座標系(ψ, χ)(ψ は磁束関数(flux function), χ は磁気ポテンシャル(magnetic potential)を表す)において

$$\frac{\partial}{\partial \psi} \oint \frac{d\chi}{B^2} = 0$$

という関係で理論的に定義された「安定限界の磁力線(ψ_c)」の内側でも観測され、その擾乱が以下のような特性を持つことが確認された⁵⁸⁾;

- (1) 垂直方向の波数 $k_{\parallel} = 0$ である。
- (2) 周波数スペクトルは広範囲で100kc/s周辺に集中される。
- (3) 位相速度は $4\times 10^5\text{cm/s}$ で、反磁性電流の方向を向いている。
- (4) 密度擾乱とポテンシャル擾乱は位相が異なっている。

(5) 擾乱振幅は、磁場の強さにもなって減少する。

(6) もしイオン温度が荷電交換反応によって低下するならば、擾乱の振幅は減少する。そして、これらの特徴から、クアドルポールで観測された不安定性は、オクトポールでは安定化されたはずの交換型不安定性であると特定されたのである。これに関連して、ヴォーヒーズと大河はクアドルポール配位とオクトポール配位でのプラズマのふるまいを比較することを目的として、別途小型サイズの内部導体装置を作成し、追実験を行っている⁵⁹⁾。同小型装置は8本の内部導体によって、プラズマパラメータを変えずにオクトポールとクアドルポールの配位変換が容易にできるような工夫が凝らされており、電子ビームで弱イオン化された水素プラズマ(プラズマ密度 10^9cm^{-3} 、電子温度約 1eV)の閉じ込め実験が行われた。その結果、先の改造した装置での実験と同じように、クアドルポール配位でのプラズマ中の擾乱レベルは、オクトポール配位のもの比べて著しく大きく、安定限界の磁力線の位置も特定することが出来なかったという。

4.2 第3回IAEA会議での報告：オクトポールとクアドルポールの比較

第3回IAEA会議で発表されたクアドルポールの実験では、上述の内容に加えて、トロイダル磁場を付加した結果についても論じられている⁶⁰⁾。実験の結果としては、トロイダル磁場を付加した場合、擾乱の振幅には影響はなかったが、約4Gの臨界トロイダル磁場で、交換型不安定性($k_{\parallel} = 0$)からドリフト不安定性($k_{\parallel} \neq 0$)に特徴が遷移する様子が確認された。以上の結果を踏まえて、大河らはクアドルポール配位で生ずる不安定性の原因は、磁気井戸の深さがオクトポールよりも浅いことであると指摘した。また、クアドルポールの不安定性はオクトポールで観測されたMode IIIと特徴が似ていて、「曲率の悪い方向への平均ドリフト速度を形成する大きなイオン回転半径」、「磁力線に沿ったイオンバウンシング周波数とドリフト波周波数のあいだの共鳴」、さらに「ドリフト波とイオンドリフト運動のあいだの共鳴」がその発生要因と解釈された。

なお、第3回IAEA会議後もトロイダル・クアドルポールでの実験は継続された⁶¹⁾。その中では、オクトポールの場合と同様に、高密度のプラズマを入射した際には、入射口付近で解き放たれた中性粒子との荷電交換相互作用によって、閉じ込め時間が低密度の場合と比較して短くなることが確認された。具体的には、 $4 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 以上のプラズマ密度で、中性粒子は他の損失と同等の影響を与えるようになったという⁶¹⁾。

このほか、装置には3つのプレートがリミッターとして取り付けられた。これらは閉じ込め容積を制限することを目的として設置されたものであったが、リミッター間に電圧を付加することで、イオンと電子のコレクターとしても使用され、閉じ込め領域からの粒子損失の割合を見積もるためにも用いられた。また、リミッターの位置を動かして密度勾配と磁場の強さを変えられることから、イオンの閉じ込め時間(イオン流束の減衰時間)の経験則

$$\tau \sim B^b E_i^e R^r$$

の推定が行われ、実験データから b は0.5、 e は-0.5、 r は2.2と見積もられた(B は磁場、 E_i は

イオンエネルギー, $R(=|\nabla n/n|)$ は密度長). そして, ラングミュア探針を用いた観測と上記イオン流束の減衰時間から, 密度減衰時間の経験則が概算され, さらにボーム時間との比較が行われた. その結果, 密度減衰時間はボーム時間の 20 倍から 40 倍長くなることが算出され, 主要な損失機構であるリミッター損失 Γ がクアドルポール磁場の -0.2 乗におおよそ比例し, 密度減衰時間($\tau \sim \Gamma^{-1}$)のクアドルポール磁場の依存性($\tau \sim B^{0.3} R^{1.5}$)とほぼ対応することが認められた.

他方, 支持棒の影響を考察するため,

- (1) 直径 1mm の支持棒が 12 本ある場合,
- (2) (1)の支持棒を直径 3.17mm の 12 本の支持棒に置き換えた場合,
- (3) 直径 1mm の 12 本の支持棒に加えて, 直径 4.76mm の 6 本の追加支持棒, さらにプラズマを横切る垂直方向に 6.35mm の 6 本の金属棒を挿入した場合

において, 100eV のイオンにおける減衰時間がリミッターで測定されたが, 約 70 μ sの実験誤差の範囲内で, 減衰時間は支持棒の大きさや数に依存しないという結果が示された.

また, 第 3 回 IAEA 会議でも報告されたトロイダル磁場の付加は, 閉じ込め時間をボーム時間(約 20 μ s)に換算して 20~40 倍の範囲に改善することや, 不安定性の特性をフルートモードから対流モードに変えることも, その後の実験で確認された⁶¹⁾. 一方, プラズマ中に生成される「時間的には振動しない準定常的な空間的乱流」である「対流セル」に関して, 大河らの実験では, プラズマ・ガンからの入射の際に観測された電場分布が原因とされ, 40G のトロイダル磁場を付加することで除去することが出来た. しかし, トロイダル磁場を 0G から 100G まで変化させる時, 密度減衰時間は次第に 2 倍まで増加するが, 40G の地点で突然の変化を示すことはなく, このタイプの対流セルが閉じ込め時間に大きな影響を及ぼしてはいないとも考えられた. なお, これとは別にウィスコンシン大学のオクトポール実験から, 支持棒によって対流セルを導く電場が生成される可能性が指摘されたが, GA 社の実験では「主要な損失過程にはなっていない」と結論されている. さらに, 内部導体への電流誘導にともなう電場も損失過程の主要な原因としては認められず, 主だった原因は磁気井戸の浅さによって生じてしまう擾乱であるとされ, 観測された擾乱の振幅と算出された拡散率が, 密度分布と減衰時間の測定結果と一致することも提示された.

5. 再考 : 大河らによる内部導体系装置研究の意義

ここで, 本章で述べてきた大河らによる内部導体系装置の研究に関するいくつかの史実に対して, 横断的および多角的観点から再考を加えたい.

本章 2.1 節でも触れたように, GA 社での核融合研究はテキサス原子力研究財団の支援で, トロイダル・ピンチによる 5 ヶ年の実験計画として始まった. これは GA 社の理論グループによる提案がその発端になっているが, 彼らは徐々にピンチ装置からミラー装置へと関心を移してしまう. 他方, カーストもピンチでのプラズマ閉じ込めに徐々に懐疑的な見解を持つようになっていった. 例えば, ピンチ放電によって生成されるプラズマは核融合反応を起

こすには低温であり、プラズマ内に残る不純物のために加熱も困難である点を彼は指摘している⁶²⁾。そのためか、大河が新たな研究計画として非円形断面ピンチトラスと内部導体系装置を提案した際に、カーストは後者の方を支持したようである⁶³⁾。この結果として、GA 社では内部導体系装置の実験グループが組織されることになった。

なお、内部導体系装置の実験を開始した背景には、「タービュレンス(turbulence)のない静かなプラズマ」が「聖杯(“Holy Grail”)」と称され、まずは MHD 的に安定で、理論的に予言された閉じ込め時間の指標であるボーム時間を超えるプラズマ閉じ込めを実現することが、当時の核融合研究における一つの目標とされていたことも影響していたという⁶⁴⁾。そういった意味でも、平均極小磁場配位を生成する内部導体系装置は、“Holy Grail”としての役割を果たす位置づけを持っていた。現に、1965 年の第 2 回 IAEA 会議での大河らの発表は、トロイダル・オクトポールでの安定なプラズマ閉じ込めを示した。つまり、この段階で“Holy Grail”として「異常拡散を抑制した MHD(巨視的に安定なプラズマ閉じ込めの実現)」がなされたことになる。さらに、ボーム時間よりも 10 倍以上長い閉じ込め時間が確認され、結果としてトロイダル・オクトポールは“Holy Grail”としての確固たる地位を確立したのであった。

そして、その後の「オクトポール中での微視的不安定性の同定と制御」や「装置の配位をクアドルポールへ改造する試み」は、微視的不安定性に対しても安定なプラズマ閉じ込めを達成し、さらに完全な“Holy Grail”の構築を確認するための段階であったといえる。特に、クアドルポールへの配位改造には、内部導体系を議論する時に必ず生じる支持棒損失に関して、クアドルポールの方が内部導体を浮上させる支持棒の表面積を少なく出来るために、支持棒からの損失を抑えられるというメリットがあった。つまり、支持棒の影響を少なくすることが出来れば、磁気井戸の効果も相俟って、オクトポールよりもさらに安定な“Holy Grail”の実現が可能となるという意図が、大河らの中にはあったものと推察される。なお、吉川によるとクアドルポールへの改造は大河の提案であったという⁶⁵⁾。しかし、オクトポールとクアドルポールはどちらも原理的には巨視的に安定だが、 ψ_c を安定限界の磁力線、 $ds = \frac{dx}{B}$ として、閉じた磁力線のまわりで周回積分をとったパラメータ $\oint \frac{ds}{B}$ で定義される磁気井戸の深さ

$$\left\{ \oint \frac{ds}{B(\psi = \psi_c/2)} - \oint \frac{ds}{B(\psi = \psi_c)} \right\} / \oint \frac{ds}{B(\psi = \psi_c)}$$

を比較すると、クアドルポール(~3%)の方がオクトポール(~10%)よりも井戸の深さが浅くなるために、巨視的不安定性も安定化が難しい状況が起る可能性があり、第 3 回 IAEA 会議の発表では、その結果として交換型不安定性がクアドルポールの ψ_c 内でも観測されることになった⁶⁶⁾。

その一方で、追加の支持棒を挿入した場合、オクトポールでは測定されたイオンの減衰時間が支持棒損失に比例して 2 倍以内で説明されたのに対し、クアドルポールでは支持棒の表面積や本数によって閉じ込め時間の変化は見られなかった。これは換言すると、磁気井戸

が深いオクトポールの場合、巨視的な不安定性に対して安定であり、支持棒による損失がプラズマ閉じ込めに少なからず影響することになったのに対して、クアドルポールでは磁気井戸の浅さのために、オクトポールでは安定化された交換型不安定性がプラズマ中に生じてしまい、それは支持棒損失の影響よりも強くなったということを意味する。つまり、装置から取り払うことが難しい障害である支持棒よりも、磁気井戸の深さの方が閉じ込められたプラズマの安定化には強い影響を及ぼすという結果が、大河らの実験から明らかとなった。

ところで、大河はクアドルポールの磁気面をプラズマ電流で実現しようとするダブルレット(Doublet)構想について、準備中であることを第3回IAEA会議中に発言している⁶⁷⁾。その後、1968年11月には、同装置を建設していることがAPSのThe 1968 Annual meeting of the Division of Plasma Physics(開催場所: Miami Beach, Florida)⁶⁸⁾で大河によって初めて報告され、GA社でのダブルレット装置による研究は本格的に始動することとなった。これより、大河は第3回IAEA会議より前の時点で、既に支持棒の影響を取り除けるダブルレットを思案していたことになるが、その一方で1968年頃から巨大な内部導体系直流八極磁場装置(D.C.オクトポール)の建設を行っており、多極磁場による閉じ込め効果の検証作業もしばらくは継続されることになる⁶⁹⁾。

6. 本章のまとめ

以上、本章では1960年代における米国GA(GGA)社での内部導体系装置を用いた多極磁場での閉じ込め研究の変遷を追ってきた。先行研究でも論じられてきたように、大河らGA(GGA)社での内部導体系装置の研究は、同時期のプラズマ閉じ込めを制限してきたボーム時間を超える閉じ込め時間を達成し、後のトカマク装置全盛の時代を向かえる一つの契機を作っていた。しかし、大河らの研究は単純に閉じ込め時間の向上という観点だけではなく、“Holy Grail”の実現という目標のもと、ボーム拡散や交換型不安定性といった巨視的な不安定性、さらには微視的な不安定性にも安定な配位を検証する方向に進んでいた。つまり、核融合研究開発の歴史の中で、内部導体系装置は「平均極小磁場配位によるプラズマ閉じ込め研究の促進」という観点だけでなく、「核融合炉を実現するためのプラズマ物理学の確立」という役割を果たしたことについても評価されるべきであるといえるだろう。

現在、内部導体系装置を核融合炉として考えることは、現実的ではないと捉えられるのが一般的である。なぜならば、内部導体系装置を核融合炉にするためには、内部導体の周囲に熱や中性子の遮蔽層が必要で、これを含めた内部導体の直径が大きくなってしまいうという問題が生じる⁷⁰⁾。また、内部導体を支える技術的方法の確立が重要となることも困難な問題として挙げられる⁷⁰⁾。「いつの段階で内部導体系装置が核融合炉の候補から消えたのか」ということについてだが、本稿第4章および第5章でも述べたように、一般的には第3回IAEA会議で、アルティモビッチL. A. Artsimovichが内部導体系装置の支持棒損失の問題には「技術開発にかなりの時間を割かなければならない」と総括講演において結論したこと

が、悲観的な印象を広く認識させる要因になったとされている⁷¹⁾。しかしこれは換言すると、第3回 IAEA 会議より前には内部導体系装置も「核融合炉の候補」として位置づけられていたと解釈できることになる。

これに対して、大河やカーストが内部導体系装置をどのように捉えていたのかを完全に断定することは難しい。しかし、カーストは 1962 年の American Power Conference において、ピンチ放電やステラレータ装置の問題を指摘したのに対して、内部導体系装置を「構造上の難しさが障害になるようには見られない」と評している⁷²⁾。つまり、核融合炉の候補の一つとして捉えていた可能性が高い。その一方で、大河は 1967 年の雑誌 *Physics Today* の解説記事において、研究の最終目的は核融合発電であるが、現状の実験は本質的な制限を理解し、それが取り除けるかを判断することを目的としており、米国で行われていた装置シラ (Scylla) やアストロン (Astron)、さらに内部導体系装置の実験が「本質的な制限に到達した時、プラズマが核融合(発電)に対して現実的な意味があるだろう」と述べている⁷³⁾。また、大河は同記事で「現在、我々はまだ基礎物理の問題に主な関心がある」とも記していることから、内部導体系装置を「核融合発電のための捨石」として位置づけていたと判断できる。以上から、少なくとも第2回 IAEA 会議後から、大河は内部導体系装置を段階的な研究展開の上での一つの通過点として捉えていたと思われる。そしてそれ以降、内部導体系装置は「“Holy Grail”の実現」としてだけの意味を持ち、「核融合炉の実現」という観点では捉えられなくなったと考えられる。

なお、本章で取り扱えなかった大河らのグループによる D.C.オクトポールやダブレットでの研究の変遷については、別稿にて取り扱うことにする。また、同時期に諸外国で展開されていた内部導体系装置による閉じ込め研究に関しても今後の課題としたい。

文献と注釈

- 1) 玉野輝男「多極磁場」、伏見康治責任編集『プラズマ・核融合(実験物理学講座 30)』共立出版株式会社、1979年、399-412頁。
- 2) 伏見康治「アメリカの外人研究者(「あすへの話題」(コラム、1965-1966年))」、『学者の手すさび(伏見康治著作集 I)』みすず書房、1987年、87頁。
- 3) 山本賢三『核融合の40年—日本が進めた巨大科学—』ERC出版、1997年、73-77頁。
- 4) 「核融合専門部会資料「昭和43年度対称性トーラスの予備実験の実施について」(研究小委員会山本賢三→核融合専門部会長菊池正士宛)、昭和43年2月20日付」核融合科学研究所(NIFS)核融合アーカイブ室史料(ID:002-14-35)。
- 5) 木村一枝、井口春和、雨宮高久、松田慎三郎、吉田英俊「森茂氏 インタビュー記録」、2011年3月10日、於日本原子力研究開発機構(JAEA)東京事務所、NIFS核融合アーカイブ室資料(ID:100-10-01)。
- 6) 植松英穂、竹田辰興、西尾成子「日本における核融合研究開発の歴史」『日本物理学会誌』第56巻第6号(2001年)、395-402頁(特に397頁)。

- 7) 前掲 6), 398 頁.
- 8) 吉岡斉「大学系の核融合研究」, 中山茂他編集『通史 日本の科学技術』第 3 巻, 学陽書房, 1995 年, 133-145 頁(特に 138 頁).
- 9) C. M. Braams, P. E. Stott, *Nuclear Fusion Half a Century of magnetic Confinement Fusion Research* (IoP, 2002), 114-123.
- 10) J. L. Bromberg, *Fusion: science, politics, and the invention of a new energy source* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1982), 146-150.
- 11) 玉野輝男「GA Technologies 社における現状」『日本原子力学会誌』第 25 巻第 7 号 (1983 年), 513 頁.
- 12) Martin O. Stern, "Dedication week at General Atomic," *Physics Today*, 12(12) (1959): 20-24.
- 13) 大河千弘「加速器, 核融合と放射光—私の研究史と GA での研究—」『核融合研究』第 60 巻第 1 号 (1988 年), 6-12 頁.
- 14) 「海外通信 大河千弘→宮本研究室」『核融合研究』第 3 巻第 5 号 (1959 年), 576-583 頁.
- 15) 前掲 13), 6 頁. / 雨宮高久, 松岡啓介, 難波忠清, 木村一枝「大河千弘インタビュー」, 2009 年 11 月 18 日-11 月 19 日, 於大河氏邸.
- 16) 前掲 6), 399 頁.
- 17) 前掲 10), 147. 後年に, Rosenbluth と Post の共著論文が発表されている: R. F. Post, M. N. Rosenbluth, "Electrostatic Instabilities in Finite Mirror - Confined Plasmas," *Physics of Fluids*, 9(4) (1966): 730-749.
- 18) S. Braginskii and B. Kadomtsev, "Stabilization of a plasma by the use of guard conductors," *Plasma Physics and the Problem of Controlled Thermonuclear Reactions*, Vol. III (Pergamon Press, 1961): 356-385. / J. Berkowitz et al., "Cusped Geometries," *Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958*, Vol. 31 (United nation, 1958): 171-176.
- 19) J. L. Tuck, "A New Plasma Confinement Geometry," *Nature* 187(4740) (1960): 863-864.
- 20) T. Ohkawa and D. W. Kerst, "Stable Plasma Confinement by Multipole Fields," *Physical Review Letters*, 7(2) (1961): 41-42. / T. Ohkawa, D. W. Kerst, "Equilibria and Stabilities of Slightly Asymmetric Plasma Columns," *Bulletin of the American Physical Society*, 6(3) (1961): 290. / D. W. Kerst, T. Ohkawa, "Connected Plasma Containing Regions-Tuck's Cusp Bridge," *Bulletin of the American Physical Society*, 6(3) (1961): 300.
- 21) T. Ohkawa and D. W. Kerst, "Multipole magnetic field configurations for stable plasma confinement," *IL NUOVO CIMENTO*, 22(4) (1961): 785-799.
- 22) なお, 同会議の Proceedings は文献としてまとめられていない. 開催通知は次の文献に記載がある: "Announcement of 1961 Autumn Meeting of the Division of Plasma Physics," *Bulletin of the American Physical Society*, 6(5) (1961): 488.

- 23) 伏見康治「海外の核融合研究の現状と今後の見通し」『日本原子力学会誌』第4巻第4号(1962年), 263-268頁. / 「伏見所長の欧米通信」『核融合研究』第8巻第2号(1962年), 156-158頁.
- 24) D. W. Kerst, *Progress in the Field of Controlled Thermonuclear Energy*, GA-2971, 1962.
- 25) 前掲10), 146.
- 26) 前掲15), 「大河千弘インタビュー」.
- 27) 井口春和, 難波忠清, 雨宮高久, 松田慎三郎, 吉田英俊「吉川允二氏 インタビュー記録」, 2013年10月31日, 於 JAEA 東京事務所, NIFS 核融合アーカイブ室資料(ID:100-13-01). / 「クローズアップ・人 日本原子力研究所理事長・吉川允二氏」『エネルギーフォーラム』第42巻第2号(1996年), 95頁.
- 28) T. Ohkawa, et al., “Plasma Injection into a Multipole Field,” *Physics of Fluids*, 6(10) (1963): 1526-1528.
- 29) 前掲15), 「大河千弘インタビュー」.
- 30) W. C. Duesterhoeft et al., “Further Investigations of Plasma Injection into an Octapole Magnetic Field,” *Bulletin of the American Physical Society*, 9(3) (1964): 331.
- 31) H. G. Voorhies et al., “Plasma Injection across Magnetic-Field Lines into an Stabilized Magnetic Mirror,” *Bulletin of the American Physical Society*, 9(5) (1964): 532.
- 32) A. A. Schupp et al., “General Atomic Toroidal Multipole Confinement Apparatus,” *Bulletin of the American Physical Society*, 10(2) (1965): 197.
- 33) T. Ohkawa et al., “Plasma Behavior in the General Atomic Toroidal Multipole Machine,” *Bulletin of the American Physical Society*, 10(2) (1965): 197-198.
- 34) H. G. Voorhies, T. Ohkawa, “The energy spectrum of neutral hydrogen atoms from a coaxial plasma gun,” *Journal of Nuclear Energy. Part C, Plasma Physics, Accelerators, Thermonuclear Research*, 8(3) (1966): 247-254.
- 35) H. G. Voorhies, T. Ohkawa, “Use of metallic surfaces to convert hydrogen atoms to ions in the 50-3000 eV energy range,” *Journal of Nuclear Energy. Part C, Plasma Physics, Accelerators, Thermonuclear Research*, 8(5) (1966): 555-560.
- 36) T. Ohkawa, A. A. Schupp, M. Yoshikawa, H. G. Voorhies, “Toroidal multipole confinement experiment,” *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of a Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research held by the International Atomic Energy Agency at Culham, 6-10 September 1965*, Proceedings Series, Vol.2, (Vienna: IAEA, 1966), 531-544(CN-21/115).
- 37) D. H. Birdsall, R. J. Briggs, S. A. Coagte, H. P. Furth, C. W. Hartman, “Shear-stabilization in the Levitron,” *Ibid*, 291-312 (CN-21/90).
- 38) D. Eckhardt, G. von Gierke, G. Griger, “Comparison of alkali plasma loss rates in a stellarator and in a toroidal device with minimum mean-B properties,” *Ibid*, 719-731 (CN-21/50).

- 39) R. J. Bickerton, "Closed line experiments," *Summaries of results relating to plasma containment presented at the Culham conference (CLM-L13)*, (Culham: Culham Laboratory, 1966), 1-9.
- 40) Lyman Spitzer, Jr., "Controlled Nuclear Fusion Research, September 1965: Review of Experimental Results," 前掲 39), Vol.1 (1966), 3-11.
- 41) 森茂『核融合海外出張報告(JAERI-memo 第 2106 号)』, 日本原子力研究所, 1965 年, 31-52 頁.
- 42) 「[米国 8 人委員会報告書訳] 制御熱核融合反応研究についての調査委員会(REVIEW PANEL)報告書 1965 年 12 月」, NIFS 核融合アーカイブ室史料(ID: 159-06-07).
- 43) 吉川庄一, 飯吉厚夫 『核融合入門—高温プラズマの閉じ込め—』 共立出版株式会社, 1972 年, 59 頁.
- 44) Ibid., 91-92 頁.
- 45) T. Ohkawa, M. Yoshikawa, "Experimental Observation of Drift Instabilities in Toroidal Plasma," *Physical Review Letters*, 17(13) (1966): 685-688.
- 46) T. Ohkawa and N. Rostoker, "Plasma confinement in the toroidal multipole," *Physics Today*, 20(12) (1967): 48-55.
- 47) M. Yoshikawa, T. Ohkawa, A. A. Schupp, "Plasma Confinement in the General Atomic Toroidal Octopole," *Physics of Fluids*, 11(10) (1968): 2265-2271(特に 2266).
- 48) 前掲 46): 52. / Ibid: 2267.
- 49) 前掲 46): 52. / 前掲 47): 2265.
- 50) 前掲 46): 52-53. / 前掲 47): 2269-2270.
- 51) 前掲 47): 2270.
- 52) 前掲 43), 64 頁.
- 53) 前掲 46): 52.
- 54) 前掲 47): 2270-2271.
- 55) T. Ohkawa, M. Yoshikawa, A. A. Schupp, "Plasma instabilities in Gulf General Atomic multipole devices," *Plasma physics and controlled nuclear fusion research : proceedings of a Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research held by the International Atomic Energy Agency at Novosibirsk, 1-7 August 1968*, Proceedings Series, Vol.1, (Vienna: IAEA, 1969), 329-338(CN-24/C-2).
- 56) 前掲 15), 「大河インタビュー」. / "General Atomics History," <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/general-atomics-history/>.
- 57) A. A. Schupp, T. Ohkawa, "Design considerations for a small aspect ratio toroidal quadrupole," *Bulletin of the American Physical Society*, 12(5) (1967): 788-789.
- 58) T. Ohkawa, M. Yoshikawa, "Experimental Observation and Theoretical Interpretation of Low-Frequency Interchange Instability in "Average Minimum-B" Configurations," *Physical Review Letters*, 19(24) (1967): 1374-1376.

- 59) H. G. Voorhies, T. Ohkawa, “Comparative Study of Plasma in Toroidal Quadrupole and Octopole Configurations,” *Physics of Fluids*, 11(7) (1968): 1572-1578.
- 60) 前掲 55), 334-336.
- 61) M. Yoshikawa, T. Ohkawa, A. A. Schupp, “Plasma Confinement in a Toroidal Quadrupole,” *Physics of Fluids*, 12(9) (1969):1926-1938.
- 62) 前掲 24), 6-9.
- 63) 西尾成子, 竹田辰興, 植松英穂「大河千弘インタビュー」, 1995年1月23日, 於ホテルオークラ.
- 64) 前掲 15), 「大河千弘インタビュー」.
- 65) 前掲 27), 「吉川允二インタビュー」.
- 66) 前掲 55), 330.
- 67) 宇尾光治「トーラス装置によるプラズマ閉じ込め実験の現状(ノボシヴィルスク会議に関連して)」『超高温研究』第6巻第2号(1969年), 71-74頁. / 田中正俊「ノボシビルスク核融合会議報告」, 1968年, JAEA 那珂核融合研究所アーカイブス山本賢三史料 (ID:106-03-02).
- 68) T. Ohkawa, “Multipole Configurations with Plasma Current,” *Bulletin of the American Physical Society*, 13(11) (1968): 1527.
- 69) 雨宮高久「大河千弘と核融合研究 III」『日本大学工学部学術講演会論文集』(2011年), 1313-1314頁(O-28). : <http://www.cst.nihon-u.ac.jp/research/gakujutu/55/pdf/O-28.pdf>
- 70) 前掲 1), 411-412頁.
- 71) L. A. Artsimovich, “Survey on closed plasma systems,” 前掲 55), 11-17.
- 72) 前掲 24), 14-16.
- 73) 前掲 46): 54-55.

第8章 本稿の総括

本稿では、核融合研究開発史において黎明期と称された1950年代から1960年代にかけての日本人研究者の動向について、先行研究では詳細に取り扱われていない、もしくは言及されていない内容を文献史料や関係者へのインタビューなどを通して調査・研究することで、新たに判明した諸事項を提示し考察してきた。本章では、各章で明らかにした内容をあらためて総括する。

第1章では、先行研究で扱われた1950年代から1960年代にかけての核融合研究開発史に関する内容を国内外の両面から論じ、また現状の核融合研究開発史において言及されていない内容を列挙することで、本稿で取り扱う項目を明示した。

第2章においては、1950年代末に国内の研究方針を決定づけた出来事である「A-B計画論争」に関して、当時非公開とされていた核融合専門部会の議事録や研究者の論考に基づき、A-B計画の背景と「A-B計画論争」による両計画の変化を論じた。B計画提案の背景には、先行研究で強調されている1958年9月開催の第2回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ会議)での国際的情勢(巨大装置による実験が米国・英国・ソ連を中心に行われているが、未だ核融合炉の実現には至っていない)に加えて、それ以前に核融合懇談会が行ったアンケートでの東大グループなどの回答や菊池正士による試案の存在が強く影響していた。これを換言すれば、B計画は第2回ジュネーブ会議というあからさまな海外情勢だけではなく、国内での議論を契機として発案されたものであり、実験家(特に宮本梧楼)が主張する「工学分野の基礎研究」としての位置づけを持つものであった。また、核融合懇談会のアンケートからは、研究所構想の中からA-B計画の原案が提案されたということも判明した。しかし、B計画は研究計画を発展段階論的に考え、「基礎研究からの積み重ね」を主張する多くの研究者の賛同を得ることは出来なかった。つまり、多くの研究者は「B計画=基礎研究」とは解釈できなかつたのである。一方、A計画は「新しい着想の育成と具体化」として、B計画との併行路線が採用されることが専門部会の前提にあった。そこには、単に基礎研究と研究者の養成だけを行うのではなく、諸外国に追いつき追い越せという観点から、日本独自のプラズマ閉じ込めに関する「新しい着想」が提案される土壌をつくる必要があるとされたためである。しかし、佐藤正知と川上一郎の論考にある「新しい着想は研究の積み重ねによって成り立つもの」という評価に代表されるように、この考え方も発展段階論的な積み重ねを前提とする考え方には馴染まず、また現状を無視したものとして多くの研究者に捉えられてしまった。その結果、最終的な専門部会報告書ではA計画は「基礎研究と研究者養成」として取り扱われることになった。なお、このA計画の考え方を根拠として、1961年に創設された名古屋大学プラズマ研究所(プラズマ研)は、「基礎研究と研究者養成」を研究方針に設定したと考えられる。

第3章では、黎明期における日本原子力研究所(原研)、電気試験所(電試)、理化学研究所(理研)の核融合研究のはじまりと展開を明らかにした。この3研を横断的に比較すると、核融

合研究を所内の研究課題として取り上げた時期は 1950 年代でほぼ一致している。しかし、そのバックグラウンドを見てみると、電試はそれまでに所内で行われていた避雷針や放電に関する研究をそのまま展開することによって、1957 年には 3 研の中でいち早く核融合研究体制を確立している。その一方で、原研と理研は電試よりも約 1 年程度遅れていた 1958 年頃から核融合研究を開始し、1965 年には既に計測に関して共同研究をスタートしていた。このことは、1968 年 7 月に決定した「核融合研究開発基本計画」における共同研究体制の確立に少なからず影響を与えたと考えられる。他方、3 研が「核融合」を研究課題として取り上げた頃、B 計画の先送りが決定し、A 計画に基づく研究を推し進めることが、核融合懇談会を中心とする研究者コミュニティのなかでのコンセンサスとして構築されていた。なお、研究内容だけを見れば、3 研も 1960 年代半ばには基礎研究重視の路線を取っているように捉えられる。しかし、3 研の基礎研究には「将来的な中型装置・大型装置の研究に向けた地ならし」という意味合いが、かなり強調されていたといえる。たしかに、3 研が基礎研究を開始したきっかけは、第 2 回ジュネーブ会議が開催された頃の世界的研究の趨勢(基礎研究への回帰)や各機関内で行った研究の行き詰まり(特に電試)などではあったが、それでも「いずれは行われるであろう中型・大型装置でのプラズマ閉じ込めに関するプロジェクト研究」が研究開始当初から 3 研において展開された核融合研究の念頭に置かれていた背景には、3 研の核融合研究を先導した研究者のなかに B 計画を議論した核融合研究委員会参加者が含まれていたこともひとつの要因になったと推察される。このように、1950 年代から 60 年代における原研、電試、理研の核融合研究に貫かれていた「核融合」をねらった研究方針や研究所間での共同研究、さらには B 計画の哲学といったものが、結果として「核融合研究開発基本計画」のバックボーンになったといえ、これらによって、1970 年代以降に展開された科学技術庁原子力予算に基づく国家プロジェクトとしてのプラズマ閉じ込め研究の礎が構築されるに至ったと考えられる。

第 4 章は、先行研究では論じられてきていない国際原子力機関(IAEA)主催で開催された「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議(IAEA 会議)」への日本の核融合研究者コミュニティの取組みと同会議の国内への影響について取り扱った。第 1 回 IAEA 会議への日本国内での対応は、完全に「さぐり探り」の状態であった。「A-B 計画論争」を経て、基礎研究を重視するという国内の研究方針が決定し、プラズマ研が発足した直後であった当時の日本では、国際会議にしっかりと対応できる体制が整えられていなかった。同会議への国内における初動対応を担当することになった核融合特別委員会(融特委)も、同時期は本来の目的であったプラズマ研を中心とする国内の研究計画策定を重視し、IAEA 会議の性格を把握する作業までは本格的に取り組むことが出来ていなかった。その結果、選出された唯一の口頭発表が取消しとなり、Ioffe-bar などの重要な研究成果を正当に評価することも出来なかったため、第 1 回 IAEA 会議は日本の研究体制に特段の影響を与えることはなかったといえる。しかしその反面、国際会議への対応の重要性や国際交流を積極的に行うことの必要性を研究者たちは認識し、このときの反省が融特委での国際交流小委員会の新設へと活か

されることになった。第1回 IAEA 会議の反省を踏まえた第2回 IAEA 会議に対する国内での準備は、早い段階から熱心に行われていた。そこには、プラズマ研を中心とする各地の研究機関における基礎研究の進展に対して、研究者のなかに一定の自信があったことも影響していたと考えられる。ところが、実際に第2回 IAEA 会議に出席した研究者が目の当たりにしたのは、小型装置による「基礎研究」から中型・大型装置を用いた核融合指向の「閉じ込め研究」への世界的な方針転換であった。その結果、会議後の日本では「閉じ込め研究」をベースとする将来計画に関する提案がいくつか出され始めた。しかし、関口忠による「新研構想」などは現状を否定し、急激な研究方針の転換を図るものとして解釈され、研究者のあいだでは反対意見が大半を占めてしまう。ところが、それでも世界的な動向が「閉じ込め研究」に遷移している現状を無視できない日本では、徐々に「閉じ込め研究」を行う体制づくりを開始し、原研の JFT-1 やプラズマ研の「附加磁界4極計画」など、第2回 IAEA 会議での内部導体系装置の成果に基づく研究計画が立案されていった。その最中に開催された第3回 IAEA 会議では、世界的な「トカマク旋風」を巻き起こす成果がソ連によって提示されたが、そのことよりも会議直後に国内で強調された点は、第2回 IAEA 会議で成果を出した「内部導体系装置への悲観論」であり、このことをきっかけとして、再び日本の現況が世界から遅れを取っていることが露呈する。これにより、建設予定であった装置に対する再検討が行われ、原研の JFT-2 へのトカマク配位の採用やプラズマ研での外部導体系装置である JIPP-I の建設へと繋がることになった。このように、1960年代に開催された IAEA 会議は国内の核融合研究体制や将来計画の議論を巻き起こすきっかけのひとつになっていた。その背景には、IAEA 会議への国内での対応の確立によって、諸外国の研究成果を把握しやすい状況が構築されたことに一因があるといえる。しかし、特に第2回 IAEA 会議後に行われた国内の議論では、「基礎研究を重視する」と定めた当初の研究方針を転換することへの抵抗が大きく働くことになる。そのため、国内での研究方針が「閉じ込め研究」へと転換したのは、第3回 IAEA 会議開催後になってからであった。そして、同会議とその後の状況に基づく新装置の建設の際には、多額の費用を投じて建設される新装置が日本の独自性を確保しつつ、世界の核融合研究と太刀打ちできるかという点に関する不透明さがあった部分に関して、関連する委員会でのコンセンサス形成の前に、IAEA 会議の出席者および同会議に基づく世界的な情勢を判断した少数名の研究者による「英断」が存在していた。

第5章では、第4章の内容と関連して、各国の IAEA 会議出席者が執筆した会議報告論文を比較することで、当時の研究者が IAEA 会議での各発表に対してどのような見解を示していたのかを概観し、核融合研究開発史の再評価を行った。その結果、第1回 IAEA 会議におけるソ連クルチャトフ研究所のヨッフエらによる Ioffe-bar での複合磁場配位のミラー装置に関する評価や、アルティモービッチの総括講演での「煉獄」発言の位置づけ、第2回 IAEA 会議での大河千弘らジェネラル・アトミックによる内部導体系装置による水素プラズマの閉じ込め実験や、ドイツのステラレータ装置 Wendelstein-I と内部導体系装置でのセシウム

プラズマ閉じ込め実験の評価は、これまでの核融合研究開発史の中での位置づけと当時の研究者の見解に違いがあることが判明した。その一方、第3回 IAEA 会議で発表されたソ連のトカマク T-3 および TM-3 の実験結果に対する会議報告論文での評価は、通史での位置づけとの大きな差異は見られず、この評価が一般的なものであったことがうかがえる。しかし、第3回 IAEA 会議での内部導体系装置の成果に関しては、会議報告執筆者の立場によって評価が異なっていたことが明らかとなった。また、別の観点として、日本人出席者の会議報告論文における内容が、回を重ねるごとに諸外国のものと一致する傾向が見られた点も今回の調査における特記事項として挙げられる。そこには、第4章で論じた IAEA 会議への国内の取組みも影響して、海外の研究を積極的に国内へ受容する体制が確立していったことが一因として挙げられる。

第6章においては、プラズマ・核融合分野の国際会議誘致と開催に関する国内の核融合研究者コミュニティの動向を明らかにした。1960年代前半から、日本では核融合関連の国際会議を誘致する議論が起こった。海外視察を行った長尾重夫、伏見康治によって議題に取り上げられた国際会議誘致論は、当初は電離気体现象国際会議の誘致を目的としていたが、その議論の中から IAEA 会議の誘致論が生じた。しかし、IAEA 会議を誘致することは、日本の核融合研究の立場上、時期尚早であるとされ、1960年代に同国際会議を日本で開催することは出来なかった。その後、1960年代後半は日本国内での核融合研究の方針がコミュニティにおける議論の中心となり、国際会議誘致論は完全に先送りとされるが、1969年には再び誘致および開催の議論が起る。その結果として、1971年2月に原研主催で日本初の国際会議として「国際的トーラス討論会」が開催されるに至った。「国際的トーラス討論会」の開催が成功した背景には、「国内研究の促進が国際会議誘致には必要」という嵯峨根遼吉の叱責(1963年)が大きな影響を与えていたといえる。換言すれば、1960年代にかけて核融合研究者コミュニティ内で行われた国際会議誘致に関する議論は、日本国内の研究を推進する起爆剤としての役割を間接的に担い、さらには IAEA 会議への対応と同様に、諸外国との研究方針などの違いを日本人研究者に認識させる一つの契機になっていたと結論される。

第7章は、1960年代に諸外国の研究機関で活躍した日本人研究者の一例として、「頭脳流出組」と称された大河千弘が、ジェネラル・アトミック(GA社)で行った内部導体系装置の研究に関して、文献史料および関係者へのインタビュー内容を踏まえて、その変遷を論じた。大河を中心としたGA社の研究者による内部導体系装置での平均極小磁場効果の実証は、先行研究でも論じられてきたように、同時期のプラズマ閉じ込めを制限してきたボーム時間を超える閉じ込め時間を達成し、後のトカマク装置全盛の時代を向かえる一つの契機を作っていた。しかし、大河らの研究は単純に閉じ込め時間の向上という観点だけではなく、安定したタービュレンスのない静かなプラズマ(“Holy Grail”)を実現する装置という目標のもと、ボーム拡散や交換型不安定性といった巨視的な不安定性だけでなく、微視的不安定性にも安定な配位を検証する方向に進んでいた。一見すれば、“Holy Grail”と閉じ込め時間

の向上は同一の内容を指しているように捉えられるが、大河らの中では、同装置を用いた実験は閉じ込め時間を延ばすことではなく、あくまでもボーム拡散や交換型不安定性を抑えたプラズマ閉じ込めを実現することに観点が向けられていた。そのため、核融合研究開発史の中で、内部導体系装置は「平均極小磁場配位によるプラズマ閉じ込め研究の促進」という観点だけでなく、「核融合炉を実現するためのプラズマ物理学の確立」という役割を果たしたことについても評価されるべきであるといえる。

なお、ここまで述べてきた本調査・研究の結果を総括して考察すると、1950年代から1960年代にかけての日本の核融合研究開発史について、幾つかの史実解釈に以下のような加筆・修正が必要といえる。

- (1) 「A-B 計画論争」において、基礎研究を重視していた当時に、B 計画という無謀な計画の強力な支持者というレッテルが貼られていた宮本梧楼であるが、彼の B 計画哲学は「工学の基礎研究」という意味あいを持っており、さらに物理学と工学の同時併行路線が必要との見解は、核融合専門部会での A-B 計画立案前から宮本などの研究者のあいだで既に検討されていた。この B 計画に関する哲学は、1970年代に原研、電総研、理研で行われた「核融合研究開発基本計画」に基づくプロジェクト研究にも少なからず影響を与えていたといえる。特に、原研の JFT-1 は、その後原研内で行われたトラス研究の変遷を考慮すると、結果として B 計画的な位置づけの装置になっていたと評価できる。
- (2) IAEA 会議に代表されるような国際会議への参加や在米日本人研究者の研究活動をきっかけとして、日本人研究者は国外の研究情報を受容する方法を学び、さらに同分野における国際的な貢献を検討するようになっていった。回を重ねるごとに IAEA 会議で発表された諸外国の研究状況を把握し、会議のトピックスを受容する環境が整えられていったという状況は、まさに日本の核融合研究における国際化が進んだ証であると捉えることができる。その結果、研究者たちは「国内からの独自のアイディアの創造」を目論むことをやめて、「諸外国の成果を踏まえた上でのアイディアの考案」に積極的に取り組むようになっていった。しかし、国内の核融合研究方針をシフトさせることは、先行研究で論じられているほど一筋縄ではいかなかったといえる。
- (3) 1960年代に大河千弘が GA 社で行った内部導体系装置の研究は、プラズマ閉じ込め時間の延長ではなく、安定なプラズマ閉じ込めを目標として実験が行われていた。そのため、大河らが書いた論文では、観測された擾乱の分析が主題に置かれ、閉じ込め時間の長さについては詳細に触れられてはいない。なお、当初の段階では日本人研究者に大河の意図が正確に伝わっていたとは考えづらい。現に、原研で行われた内部導体系装置の研究論文には、観測された不安定性の解析も然ることながら、閉じ込め時間の分析結果も併記されていた。また、JFT-2 も当初は「トカマク／スフェレータ両用可能の versatile 設計」として配位が検討されていた。このように、日本人研究者は 1960年代の段階において、内部導体系装置をプラズマ保持のための装置、換言すれば、閉じ込め時間の向上を図ることを目的とした実験装置として捉えていたことがうかがえる。

1950年代から1960年において、「日本独自のアイデア構築」という大きな志のもとで、「核融合」という新しい研究課題に取り組み始めた日本人研究者であったが、当初は基礎研究重視という観点を強調したことで、かえってアイデアを生めず、さらに大規模な研究を推進できない状態に陥ってしまっていたといえる。もちろん、B計画の立案経過や原研・理研・電試における研究の変遷からは、将来の中型・大型装置によるプロジェクト研究を意識した日本人研究者がこの当時からいたことは明らかであるが、基礎研究と中型装置の併行路線を狙った目論みは時期尚早として多くの研究者の賛同を得られず、実現にこぎつけることは出来なかった。この状況を打破したのが、1960年代の国際会議への出席や諸外国で行われていた研究情報の収集、在外日本人研究者の研究などであった。これらが契機となり、国内での中型・大型装置の建造が決断され、日本の研究態勢にメスが入ることになったといえる。さらに、日本独自のアイデアを創造するための土壌も養われ、その結果が1970年代以降に3大トカマクやITER計画への参画に代表されるような、世界の核融合研究をリードする状況が国内に構築される一因になったと結論される。

以上、本稿では核融合研究黎明期における日本人研究者の動向について、先行研究での不備な内容を調査し、そこから判明した諸事項に関して考察を加えてきた。なお、核融合研究黎明期に関わる歴史には、本稿で取り扱えなかった内容にも詳細な調査・研究が必要とされる事項があり、それは各章の最後に提示した。同内容に関しては、今後の課題として調査・研究を継続し、最終的には研究者個人の動向に基づいた核融合研究開発史の全体像を明らかにすることを目指したい。

謝辞

本論文に関わるに調査・研究にあたっては、指導教授である植松英穂先生(日本大学理工学部教授)および西尾成子先生(日本大学名誉教授)には調査・研究の段階から論文作成に至るまでさまざまな御指導、御助言を頂戴した。また、自然科学研究機構核融合科学研究所核融合アーカイブ室および旧評価情報室の皆様には、史料調査への御協力および本研究内容に関しての御指導、御意見を頂いた。特に、松岡啓介先生(核融合科学研究所名誉教授)、難波忠清先生(核融合科学研究所核融合アーカイブ室共同研究員)、木村一枝氏(核融合科学研究所核融合アーカイブ室共同研究員)、河本善子氏(元核融合科学研究所評価情報室員)、橋本香苗氏(核融合科学研究所図書室員)には、本研究開始当初から御指導、御支援を頂いた。さらに、大河千弘先生(元ジェネラル・アトム副会長)、吉川允二先生(元日本原子力研究開発機構理事長)、森茂先生(元日本原子力研究開発機構理事)、黒田勉先生(核融合科学研究所名誉教授)、寺嶋由之介先生(名古屋大学名誉教授)、大林治夫先生(核融合科学研究所名誉教授)、佐藤正知先生(日本大学名誉教授)、玉野輝男先生(筑波大学名誉教授)には、本調査・研究に関する必要不可欠である貴重な証言を頂いた。なお、同先生方へのインタビューの際には、松田慎三郎先生(東京工業大学研究員)、吉田英俊先生(日本原子力研究開発機構)、井口春和先生(核融合科学研究所核融合アーカイブ室共同研究員)および上記の核融合アー

カイク室関係各位に御協力を頂いた。このほか、小島智恵子先生(日本大学商学部教授)からは史料に関する情報を頂戴し、高津秀幸先生(日本原子力研究開発機構)、大原比呂志先生(日本原子力研究開発機構)、牛草健吉先生(日本原子力研究開発機構)には日本原子力研究開発機構所蔵史料の調査の際に、また棚橋誠治先生(名古屋大学理学部教授)と岡本祐幸先生(名古屋大学理学部教授)には名古屋大学坂田記念史料室所蔵資料の調査の際に御協力を頂いた。さらに、野木靖之先生(元日本大学理工学部教授)、高橋努先生(日本大学理工学部教授)、浅井朋彦先生(日本大学理工学部准教授)にはプラズマ・核融合に関する専門的知識を御指導頂き、鈴木潔光先生(日本大学理工学部教授)、渡部政行先生(日本大学量子科学研究所教授)、相澤正満先生(日本大学量子科学研究所教授)、上原和也先生(元日本原子力研究開発機構)、久保伸先生(核融合科学研究所教授)、平田久子先生(筑波大学シニア研究員)、藤田順治先生(核融合科学研究所名誉教授)には、本研究を遂行する際に有益なコメントを頂戴した。御指導、御支援、御協力を頂いた多くの先生方に心より御礼申し上げる。