

核融合科学研究所の設立に至る歴史

松岡 啓介 核融合科学研究所
(核融合科学専攻)

核融合の歴史については、末尾の参考文献が参考になる。ここでは、これまでの書き物に対して黎明期の歴史に新しい材料を付け加えた。また、大学における環状磁場閉じ込め核融合の歴史を、在る程度関わった立場から私見を交え、黎明期から核融合科学研究所の設立までを記述した。大学における核融合研究に関して、学術と開発の棲み分けがどうあるべきか、何をもちて独創性と言うのか、新大型計画に対するコミュニティの参画、に着目した。

核融合研究の始まり（世界と日本）

核融合研究は 1930 年代に星の核現象についての研究から始まった。「熱核融合」という言葉は、天文学者である Fritz Houtermans (独) と Robert d'Escourt Atkinson (英) によって命名された。Carl F. von Weizsäcker (独) & Hans Bethe (米) は、恒星の熱源は核融合反応であるという論文を 1937 年に発表した。これによって、Bethe は 1967 年にノーベル物理学賞を受賞した。

核融合を目的とした実験が始まるのは 1950 年に入ってからである。先進国は、ソ連、米国、英国の 3 国であった。ソ連においては、big bang の背景放射で有名な George Gamow が 1930 年ごろ Nikolai I. Bukharin から核融合研究のリーダーとなるよう依頼され、週に一度深夜にモスクワを停電にして実験を行ってはどうかと提案されたが、Gamow はその提案を断っている。筆者は 30 年ほど前には、トカマクの実験を行うとモスクワ

第2章 基盤機関の成立史

の灯が消えると聞いていたが、事の真相は上記のようなことらしい。その後、1950年に若い軍人であった Oleg Lavrentiev は静電閉じ込めのアイデアをソ連政府に書き送った。それを受けて、Joseph Stalin は Igor Y. Tamm と Andrei Sakharov に核融合研究を主導するよう依頼した。Sakharov と Tamm は、静電場ではなくトカマクの原型となる強いトロイダル磁場を用いた熱核融合反応炉を1950年頃に構想し、1940年代から原子力研究開発の責任者であった Igor V. Kurchatov に相談した。1951年にアルゼンチンの Juan D. Peron 大統領が核融合の成功（実は間違いであった）を発表したため、同年 Stalin は核融合をソ連の国家計画とし、Lev Artsimovich が実験プログラムの責任者に指名された。この後、Artsimovich は確固たる信念を持ってトカマクの改良を重ねることになる。

Peron の発表は、当然米国にも影響を与え、米国では Project Sherwood (1951-1958年) が発足し、Pinch, Mirror (リーダー: Livermore の Richard Post), Astron, Cusp 等の装置が建設された。PPL (プリンストンプラズマ物理研究所) では Matterhorn Project が1951年に始まり、Lyman Spitzer が8の字 Stellarator を発明した。model-A Stellarator から始まり、最後に建設されたのは有名な model-C Stellarator である。平衡に必要な磁力線の回転変換を配位の捻り(8の字に捻っている)によって作り出すというアイデアである。その後、MHD 安定性の観点から、回転変換をプラズマの小半径方向に変化させる(有限の磁気シアを持たせる)ことの必要性が指摘され、model-C ステラレータからはヘリカルコイルが(回転変換を作る $1(\text{エル})=2$ と磁気シアも作る $1=3$ のヘリカルコイルが各々レーストラック形状の両半円部に)用いられた。

ソ連、米国と並んで核融合先進国であった英国では、Peter Thonemann が Oxford 大学の Clarendon Lab. でトーラス装置による研究を始めた。誘導電流の他、RF による電流駆動など先進的な研究も行っている。これらの研究は1956年ごろ、Harwell 研究所の ZETA (Zero Energy Thermonuclear Assembly) に集約され、後の Reversed Field Pinch に発展する。トカマ

クとの違いは、トロイダル磁場の強さとプラズマ電流の大きさ（ポロイダル磁場）の比率である。トカマクではトロイダル磁場／ポロイダル磁場の比が大きく、ZETA では小さい。が、装置としては兄弟であると言える。1958年にZETAで発生した中性子は熱核融合反応によるものではないことが発表され、英国は権威を失墜することになった。トロイダル磁場が弱いために、激しいMHD（巨視的）不安定性に見舞われており、不安定性の結果生じる電場によって加速された重水素イオンが真空壁に付着した重水素との核反応の結果生じた中性子であった。Culham (Harwell は1958年にCulhamとなる) 研究所の権威の回復は、1969年に同研究所のチームがソ連のT-3トカマクの電子温度をトムソン散乱によって測定しソ連の発表が正しいことを裏付けるまで待つことになる。1950年代には、プラズマを磁場で閉じ込めるための大抵のアイデアは出揃った。

水爆実験（最初は1952年11月に米国、ソ連は1953年8月）が行われたとほぼ同じ時期、1953年12月にDwight D. Eisenhower が国連総会において”Atoms for Peace”と題する演説を行った。驚くことに、第五福竜丸事件は1954年3月で、この演説の後である。この演説を受けて、第1回原子力平和利用国際会議（通称ジュネーブ会議）が1955年8月に開催されることになり、議長のHomi Bhabha（インド）は「制御された状態で核融合エネルギーを解放させる方法が今後20年以内に見つかるであろう」という有名な演説を行った。当初は、各国とも核融合はすぐに実用化されると考え秘密裏に研究を行っていた。1956年にKurchatovがHarwell研究所を訪問し、ソ連の核融合研究の全貌を紹介（公開）した。開発が容易でなく国際協力の必要性を認識したため、トカマクと類似のZETA装置のある同研究所を訪問したのであろう。この訪問が契機となって、1958年の第2回ジュネーブ会議において各国の研究が公開されることになる。成果の発表だけでなく、実験装置そのものの公開・実演も行われ、model-Bステラレータは分解された後、現地（ジュネーブ）で再び組み立てられた。

日本における核融合研究は、原子力研究の一環として始まった。1952年

第2章 基盤機関の成立史

10月24日に日本学術会議において原子力の平和利用を目的として、「茅・伏見提案」がなされた。そこでは、原子力委員会を政府に設置する提案も行われていた。が、三村剛昂・広大教授の強い反対に遭い提案は結局撤回される。しかし、1954年3月に中曽根康弘ほかによる原子力予算2億3500万円（ウラン235にあやかった値）+1500万円がほとんど審議もされないまま国会を通る。中曽根は原子力の父と呼ばれている。官・学の動きとしては、1954年12月～1955年3月にかけて、藤岡由夫（学術会議・原子力問題委員長）を団長とする初の原子力海外調査団が派遣された。メンバーには、駒形作次（日本原子力研究所2代目理事長）、伏見康治、大山義年、杉本朝雄ほかが含まれている。この海外調査は、日本原子力研究所の設立（1955年）や原子力3法、即ち、原子力基本法、原子力委員会法、総理府設置法改正（原子力局の設置）を総称したものを想定したものと考えられる。1956年1月1日に民主・自主・公開を基本とする「原子力基本法」が施行された。ここでは、原子力委員会を置くこと、原研を設置することが決められた。一方、国大協会長の矢内原忠雄・東大総長は原子力基本法制定時に、研究の自由を確保するため大学は原子力予算を使わない、また、国の原子力開発プロジェクトに大学を入れないことを国会に申し入れ、その旨の付帯決議が付けられた。

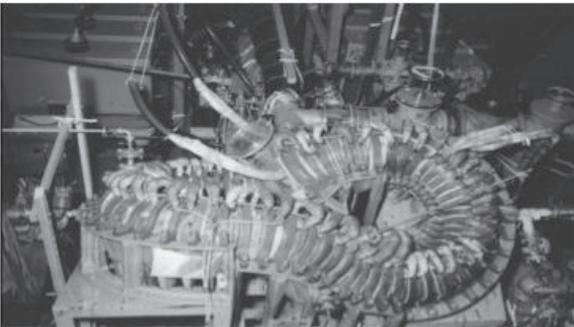
日本においても、核融合は天体の核現象の研究をその一端として始まる。一例として、京都大学・基礎物理学研究所における研究会（1955年2月）があり、その内容は科学朝日（1955年）に特集号として掲載されている。（次ページの写真）

1955年8月の第1回ジュネーブ会議には、藤岡由夫、駒形作次、本田雅健、一本松珠璣、中曽根康弘（オブザーバー）ほかが出席している。早川幸男は、メキシコの宇宙線国際会議に出席後パサデナから1955年9月に湯川秀樹に手紙（英文）を送り、米国における核融合研究の現状を報告している。その骨子は、「日本は今からでも遅くない。核融合には色々な分野の研究者の協力が必要であり、共同研究の場としては基研が適当である。」日本においても主要な大学において、1950年代には実験が始



天文と原子核に関する合同セミナー。1955年2月14日京大湯川記念館。前列左から、畑中武夫（東大）、中村誠太郎（東大）、湯川秀樹（京大）、後列左から小尾信弥（東大）、林忠四郎（京大）、武谷三男（立教大）、早川幸男（京大）。セミナーの内容は「大宇宙の原子核反応を語る」として科学朝日1955年4月号に掲載。（京大基研のご好意による）

まった。有名なものに、1956年6月の大阪大学における超高温研究会・公開実験（岡田実ほか）がある。この他に、東大理学部のパラズマベータトロン（宮本梧楼、森茂、大河千弘、吉川允二ほか）、名大工学部のト



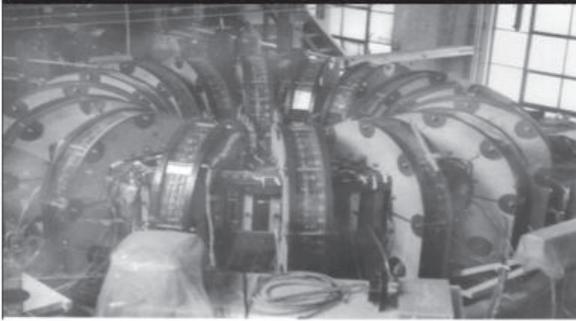
ロイダルピンチ、トカマク（山本賢三、伊藤智之ほか）、京大工学部・理学部のヘリオトロン（林重憲、林忠四郎、宇尾光治ほか）、東大工学部の

パラズマベータトロン（1959年頃）：宮本梧楼、森茂、大河千弘、吉川允二ほか。電子をトラス方向に加速するコイルは放電管に沿っている。磁場1.5〜3kG。トロイダルドリフトは配位の捨りによって抑える。（伏見資料より）

トラップストロン（山田直平、関口忠ほか）、日大の誘導ピンチ（川崎栄

第2章 基盤機関の成立史

一ほか)、東北大学の波動加熱(渡辺寧、長尾重夫ほか)、電子試験所の



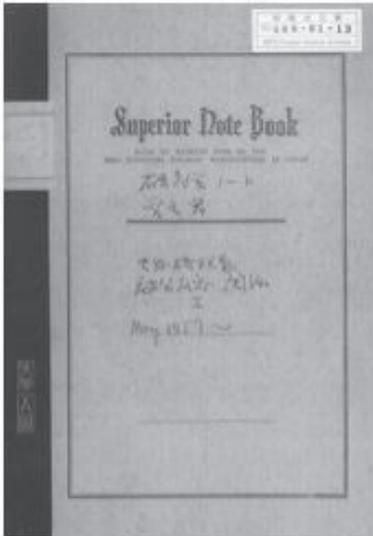
トラスピンチ
(山田太三郎ほか)、理化学研究所のピンチ、阪大超高温施設のコニカルカスプ装置(伊藤博ほか)がある。

Heliotron C (1965年): 林重憲、林忠四郎、宇尾光治ほか。カスプ磁場をトロイダル状に配置。内径14cm、磁場は約4kG。磁気井戸は可能となっている。ヘリカルコイルになるのはHeliotron D (1970年)からである。(伏見資料より)

この頃の研究の主な方向はピンチに代表されるように、狭い空間にエネルギーを集中させれば核融合反応が起こるだろうという予測で、コンデンサーに蓄積されたエネルギーを瞬時に放電させるドンパチ実験である。ZETAが悩まされたMHD不安定性を未だ考えるに至っていない。伏見康治は、“お前がこれからやろうとするのは、pure plasma physicsかdirty fusion researchか?”とA. von Engelに言われたことを参考文献で述べている。やれば何か起こるだろうというドンパチ実験はdirty researchということであろう。当時の大学の実験経費は、矢内原原則のために主として文部省科研費によって賄われた。代表的な研究機関には、機関研究費が配分された。金額は、年に数10万円から数100万円、多くて1140万円であり、当時としては大金であるが、これが何年かにわたり支給された。ただし、東大理のプラズマベータトロンの予算は校費(2000万円+290万円)である。また、後に述べる核融合懇談会の運営や会合費等コミュニティの活動には、総合研究経費が活用された。当初は、コミュニティの代表者として湯川秀樹が「核融合の総合的研究」1958年度500万円、1959年度600万円、1960年度750万円、次いで、伏見康治が「核融合の基礎研究」1961年度800万円、1962年度550万円を受給している。この時期の総額は1.3848億円になる。一方で、科技庁の原子力平和利用

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

研究委託金を受給したのは、電気試験所（1958-1962、1000-5000 万円／年）、理化学研究所（1958-1962、数 100 万円／年）、日本原子力研究所（1961-1962、数 100-1000 万円／年）、東芝（誘導ピンチ、トーラス形放電：数 100 万円／年）、日立（ICRF:多いときは 1700 万円／年）、三菱原子力（超高温プラズマ、イオン源：数 100 万円／年）、沖電気（ミリ波測定）、島津製作所（真空紫外）、関西二井（低インダクタンスコンデンサ）、神戸工業（高温プラズマの発生と観測）、日本大学（分光による電子温度測定）、昭和電工（重水素ガス製造充填）であり、総額 3.0137 億円である。当時としては、潤沢な予算であり、意気込みの強さが伺われる。しかし、後述するように 1960 年代中頃になると研究の進展が思わしくなく、予算がおりなくなり、霜降り期と呼ばれた。理論、実験が広範囲で始まったため、日本学術会議主催の第 1 回原子力シンポジウムが 1957 年 1 月に開催された。総合講演として、「軽い核の融合反応」（天体内の核融合



湯川秀樹直筆の記録ノート（京大基研より）歴史的資料 1、ID 番号：906-01-13

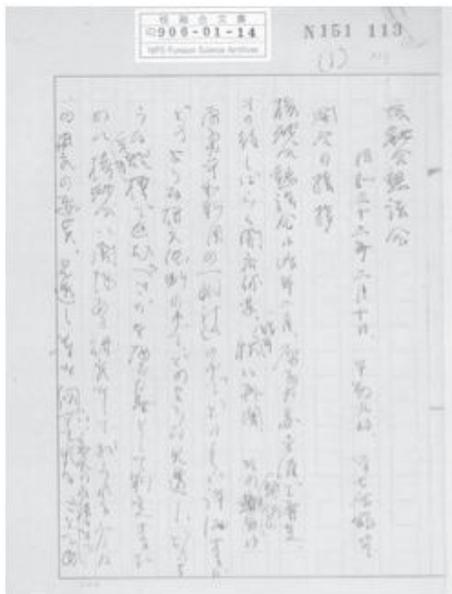
）（京大・西田稔、林忠四郎）、と「超高温実験」（阪大・岡田実ほか）が行われた。1957 年 7 月に阪大主催の超高温研究会「大電流と高温プラズマのシンポジウム」が開催された。招待された湯川秀樹は自分よりも核融合に精通している林忠四郎または早川幸男を推薦する（本人は欠席する）旨の直筆の葉書が残されている。1958 年 2 月 7-9 日には、第 2 回原子力シンポジウムが開催され、理論については早川幸男、実験については山本賢三が総合講演を

行っている。一般講演も 10 数件発表された。このシンポジウムの翌日と翌々日（2 月 10, 11 日）に核融合懇談会の設立に向けた研究会が開催され、

第2章 基盤機関の成立史

現在のプラズマ・核融合学会の前身である核融合懇談会が発足した。湯川は初代会長に選出され、設立の挨拶を行った。直筆の手書き原稿が残されている。核融合懇談会のメンバーは、大学や企業の研究者・技術者の他、文部省、科技庁の行政官（例えば、原子力局次長の

法貴四郎）も含まれた。核融合懇談会は自主的な組織であった。1958年9月に第2回ジュネーブ会議が開かれ、湯川が出席した（次ページの写真）。他に、山田太郎（電気試験所）、宮本梧楼（東大理）ほかが出席。ここでは先に述べたように、各国の研究状況が公開された。会議の状況は、後日、日本学術会議や原子力委員会の場で宮本梧楼によって



湯川直筆の核融合懇談会設立の挨拶原稿（京大基研より）歴史的資料2、ID番号：906-01-14

紹介された。宮本はある程度の成功を収める可能性のある装置としてステラレータ、ミラー、ゼータを挙げたが、A-B計画の議論において厳しい質問を受けることになる。湯川は核融合懇談会会長として、1958年10月15日に日本学術会議（兼重寛九郎会長）に「研究費の増額、施設の増強等が必要であり、学術会議を通して文部省に強く働きかけてもらいたい」旨の核融合研究促進の申し入れを行う。学術会議はそれを受けて、1958年10月31日に三木武夫科技庁長官に勧告「核融合反応研究の促進について」を行った。そこでは「核融合反応の重要性に鑑み、政府は昭和34年度予算編成にあたって、適切な措置を講ぜられたい」と核融合の

重要性が指摘された。



第二回原子力平和利用国際会議（1958年）における湯川（京大基研より）

官の委員会の動きについて述べる。原子力3法により、1956年に総理府に原子力委員会が設置された。核融合については、1957年2月に有識者の集まりとして第1回核融合反応懇談会が開催され、湯川秀樹が会長に

選ばれ、駒形作次、嵯峨根遼吉、伏見康治、林忠四郎、武谷三男ほか16名がメンバーとなった。同年10月には補充が行われ、菊池正士、早川幸男、宮本梧楼、大河千弘、山本賢三、長尾重夫、川崎栄一、山田太三郎ほか追加委員として任命された。当時の主要な研究者は大体含まれている。委員会としてもっと専門的に議論する必要があるという理由で、1958年4月に核融合専門部会が設置された。湯川部会長、宮本、林、伏見、岡田実、大河、山本、嵯峨根、畑中、川崎、渡辺寧ほかがメンバーであった。1958年10月27日の第4回専門部会では、第2回ジュネーブ会議の概要報告が、また、原子力研究所に研究グループを置くことの必要性が議論された。1958年12月16日の第5回専門部会では、宮本梧楼によってジュネーブ会議の報告が行われ、部会として「外国である程度成功の可能性がある型式の装置を建設する」と「それらとは異なった装置の研究開発を並行させる」旨の答申を出した。1959年2月20日の第6回専門部会ではB計画の準備会として中型装置の設計を行う核融合研究委員会（委員長：山本賢三）が原子力研究所内に組織された。1959年3月30日の第7回専門部会では、今後の方針としてのA計画とB計画につ

第2章 基盤機関の成立史

いて議論された。A-B 論争と言われているが、二者択一ではなく、両方必要であり、どちらを先に始めるかということである。A 計画とは、大学でプラズマ科学の促進を目的として、講座を増設し基礎研究を進める。人材を育成する。プラズマ発生の新しい着想を検討する。それらが有望であれば研究中核を作る。以上が骨子である。一方の B 計画は、外国で既に造られているプラズマ発生装置（ステラレータ、ミラー等）の中で有望なものを出来るだけ早く造ることを骨子としている。この第7回専門部会では、菊池正士が米国からの帰朝報告を行い、モデル-C ステラレータの規模に圧倒されたことが報告され、B 計画を推進すべし、と主張している。B 計画の核融合研究委員会は、1959年4月22日～1960年2月21日の間開催された。写真は発足当初に開いた合宿形式の会合の時のものである。1959年8月10日の第11回専門部会と第5回日本学術会議・核



核融合研究委員会（B 計画の検討を行う） 常滑、1959年4月24日
法貴四郎、川崎栄一、林忠四郎、宇尾光治、大河千弘、菊池正士、長尾重夫、山本賢三、宮本梧楼、木原太郎、伊藤博、森茂、田中正俊、他（山本賢三：核融合の40年より）

融合特別委員会の合同の委員会で A, B 計画が議論されたが、結論が出ず、その後の専門部会でも同数で決まらず、8月13日湯川部会長は菊池、嗟

峨根、伏見と相談しB計画の見送りを決定した。これによって、A計画の受け皿として名大プラズマ研が1961年4月に創設されることになる。

A-B論争は日本学術会議（1949年1月発足）においてより学問的な見地から議論が行われた。学術会議は1956年に科技庁（1956年設置）から「核融合は原研で行うのがよいのかどうか」の諮問を受けた。「基礎研究の段階だから研究費の積極的な配慮が必要である。研究手段が原子力とは違うので、原研が選ばれる必然性はない。あちらこちらの研究を連絡する組織が必要である。」旨の答申をしている。先にも述べたが、1958年10月31日第27回総会において、勧告「核融合反応の促進について」を出している。1959年4月に学術会議の中に核融合特別委員会（融特委）



が設置された。その目的は次の①～③である。①基本的な研究の方向について見通しと方針を立てる。②基礎研究においても大規模な装置が必要で研究費が増加傾向にある。③核融合特別委員会を作って研究体制、研究方針に遺憾無きを期する。第1回核融合特別委員会は1959年5月に、原子力問題委員長であった坂田昌一を委員長として開催された。メンバーには、藤本陽一、久保亮五、湯川秀樹、早川幸男ほかが名前を

連ねている。この委員会の前にシンポジウム（歴史的資料3、ID番号：301-11-04）が開かれ、真剣な議論が交わされた。

坂田昌一は冒頭、「核融合懇談会が発足した。原子力委員会から研究

第2章 基盤機関の成立史

方針が提起されている。学術会議に組織が無かったので本日特別委員会が発足する。意見をまとめる訳ではない」旨の挨拶を行っている。続いて、湯川秀樹が講演し、「核融合は平和利用を目指し、純粋な基礎研究とは少し違う。天体の核現象から地上の話に降りて来た。天文、原子核、流体力学等から電気工学まで含む幅広い分野である。昨年ジュネーブ会議が開催された。米国、ソ連は新しい装置を造り、思っていた以上に進んでいる。しかし、こうやれば成功するという見通しはないようだ。こういう非常に矛盾した面を持っている。専門部会としては、核融合はやはり基礎的な段階にあるが、相当規模の実験装置を日本でも造ることが必要であろうとの意見である。B計画の設計グループは出来ている。B計画の実施体制はどこが適切か。Aは文部省、Bは文部省以外（予算が大きいので）か。うまくやらないと、互いに矛盾し邪魔し合う恐れはないか。基礎科学に関する予算は、加速器、核融合、南極観測などが両立しないと困る」という講演を行った。現在でもそのまま成り立つ話である。その後、A、Bについて以下の6名による講演が行われ、真剣な質疑応答が行われた。

宮本梧楼：Aは言うに及ばずBも必要である。何をやるにしても物理と工学に基づく中型装置の経験は絶対に必要だ。自分は核融合の専門家ではないが、加速器の経験から言ってもそうだ。Aは日本独自のものを造るのであるが、Bは、最初は外国の装置のコピーであっても仕方ない。どちらか一つであるならば、Aをやって欲しい。

早川幸男：研究予算規模から議論を始めたい。現状では外国の後追いしかできない。10年くらいの間は、Bは必要ない。今は、自分でアイデアを出す人材が必要だ。大きなプロジェクトが立ち上がると人の命令で働くようになる。後からBをやればよい。

山本賢三：Aは各研究機関でやるもので、数千万円の規模。現在日本に12グループほどあるが、大体外国の装置に倣っており、格別オリジナリティがあるとは言えない。総合的な研究を行うにはBが必要である。

林忠四郎：小型の装置で焦点を絞った研究をやればよい。今、Bをやる必

要はない。

藤本陽一：ジュネーブ会議の報告では、ある程度成功を見た装置とあったが、目的にはほど遠い。質的に異なる要素が加わらなければ、実現には至らないだろう。B計画は放電工学グループの計画である。一つのグループが分不相応な計画を持ち出すと、他のグループの研究の芽を摘み取る。

菊池正士：学問的な意味でプラズマ物理を考えると目的が曖昧になる。目的を持った研究という意味でBを出した。Bを造って、ピンチやステラレータの不安定性を調べてみるのは意味がある。仮に、外国に遅れをとったとしても、である。

このあと、質問やコメントが出される。宮本梧楼の意見に対して、藤本陽一から「ジュネーブ会議報告に関して、中型装置の中身は何か？ある程度成功を見た装置の意味するところはなにか？」と質問があり、また、福田信之からは「アナロジーと想像で議論するのは政治家よりもひどい」と苦言を呈される。菊池正士に対する質問として、福田信之から「ステラレータを造ったあと、使い物にならないことが分かってもよいのか？10億円ドブに捨ててもいいのか？」が出されたが、菊池は「無駄にはならない」と返答している。湯川が、「本当に核融合を制御できる原理をもっているのかわかるかよく分からない。技術的な問題を解決して行けば、行き着けるのかどうか判断出来ない。難しい問題である」と議論を引き取り、早川は、「高温、低密度のプラズマの振る舞いは乱流的なものになるだろう。流体でも未だ分かっていないのに、磁場が入ると全く分からない。技術的な段階ではない」と主張している。佐藤正知は、「プラズマ物理学を定量的なものにするには、理論だけでなく実験が必要である。しかし、専門部会のB案には問題がある。自由に参加出来る形の懇談会で検討して研究計画を立てるべきだ。最初に予算枠があり、後から理由付けしている印象を持っている」との意見を述べている。最後に、日本学術会議会長の兼重寛九郎が、「核融合特別委員会が設立された。専門家の間に大きな意見の違いがないところまでご検討いただきたい。ましま

第2章 基盤機関の成立史

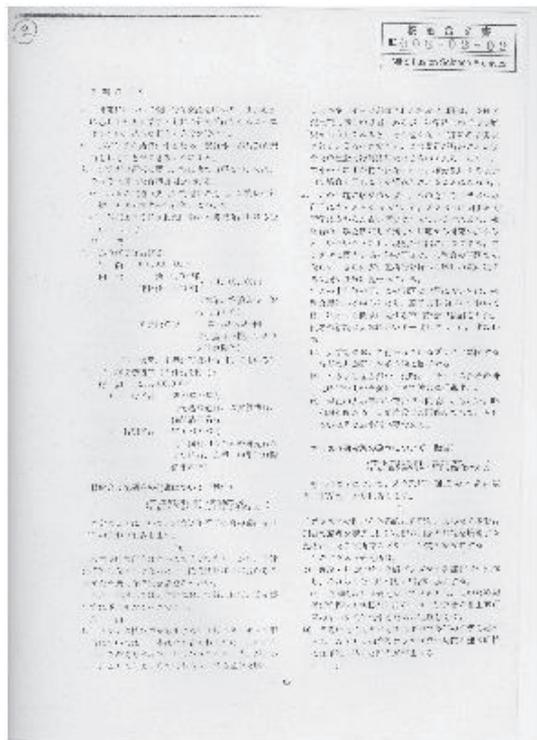
ったところで、原子力委員会としてなすべきことをしたい」とまとめた。当時の実験はプラズマの閉じ込めに目処が立っていなかったことを考えると、筆者はA計画を先行させた判断は正しかったと考えている。

プラズマ研が発足した1961年に記念すべき国際会議が開催された。ジュネーブ会議から独立したプラズマ・核融合に特化した国際会議（第一回IAEAザルツブルグ会議）である。日本からの出席者は、小島昌治、木原太郎、山田太三郎、伏見康治、長尾重夫、関口忠、他である。米国、英国も研究開始からほぼ10周年にあたるが、ソ連は、この会議を10周年記念と位置づけ、クルチャトフ研究所のアルツィモヴィッチがサマリトークで10年の総括を行っている。即ち、「高温プラズマを得るのは思ったより簡単ではない。煉獄を通らないでは天国に行けない」と発言している。この発言を受けて、世間一般には、1960年代前半は「煉獄の時代」と悲観的に捉えた論調が主流であるが、次のような部分も見られる。“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。”この発言は、10年の経験に基づく発言故に重みがある。アルツィモヴィッチ本人は現状を改善する努力を続ければ将来の展望が開けるとの信念を持っていたことが読み取れる。事実、真空技術、リミターや壁からの不純物発生、磁場の精度などを改善することにより、トカマクの性能を徐々に向上させていき、1969年にはトカマクは核融合の救世主となる。

この会議では、プラズマの閉じ込めに関して後の指導原理となる磁気井戸の重要性を示すIoffe-barの実験が発表された。が、日本からの出席者を含め出席者の殆どはその重要性を認識しなかった。出席者の一人、関口忠は後に、嵯峨根遼吉記念文集 第2部座談会「核融合研究の推進」の中で、「それ（Ioffe-barのこと）が核融合研究開発史上最初のブレイクスルーであったという重要さを十分には認識しなかったのです。それが、その後、2年程たって、わが国の将来計画の議論中に嵯峨根先生から

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

大目玉を頂戴することになった訳です。「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」と言うわけです。・・・また、プラズマ物理学を主として、必ずしも核融合研究を主としていなかったわが国の研究体制や、われわれの間の雰囲気も重要な一因であったことは確かです。」と回想している。

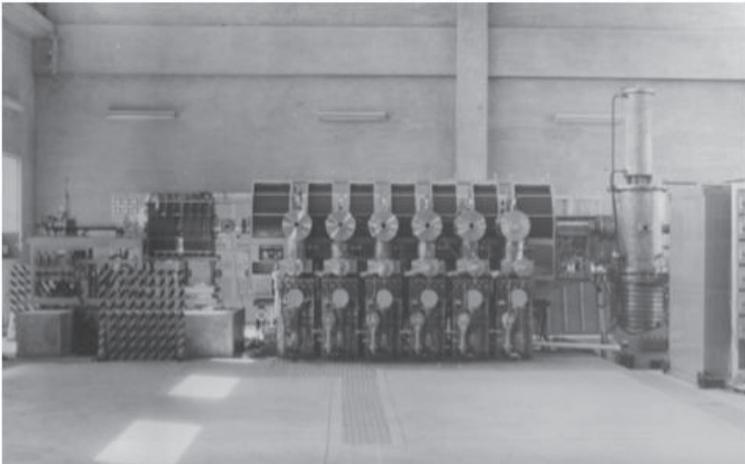


名大プラズマ研は、既に述べたように A 計画と B 計画の議論の末に A 計画の受け皿として 1961 年 4 月に創立された。湯川裁定が行われた 1959 年 8 月からの動きを見てみる。1959 年 8 月 2 日の第 4 回融特委（8 月 13 日の湯川裁定の前）において、設置場所として原研案か文部省案かを議論し、文部省所管とした。基礎科学のためのプラズマ科学研究所（仮称）

の設立を決め、木原太郎を委員長として設立準備委員会を設置した。これは、方向性を定めたものと考えられる。1959 年 9 月 8 日の第 6 回融特委（在京委員会）において、プラズマ研究所設立方針を決定した。プラズマ研は、プラズマに関する基礎的・体系的研究を行う共同研究の場であり、高温プラズマ 3 部門・基礎実験 2 部門・理論 2 部門の構想が出て

第2章 基盤機関の成立史

いる。1959年9月12日の第7回融特委（関西委員会）においてもプラズマ研究所設立方針が決定され、研究所の設立はコミュニティの総意となった。1959年10月23日の第29回学術会議総会においてプラズマ研究所設立案が可決され、1959年11月28日に学術会議勧告「プラズマ研究所の設立について」（歴史的資料4、ID番号：008-02-02、前ページ）が会長の兼重寛九郎から科技庁長官の中曽根康弘に出された。1960年5月7日の第13回融特委において、設置場所を名古屋大学とし、所長に伏見康治・阪大教授が推薦された。創設当初の組織は、高温発生3部門（長尾重夫教授ほか）・基礎実験2部門（高山一男教授ほか）・理論2部門（伏見教授、谷内俊弥教授）であり、実験として、QP（Quiet Plasma）計画とTP（Test Plasma）計画が発足した。プラズマを基礎から研究する方針であ

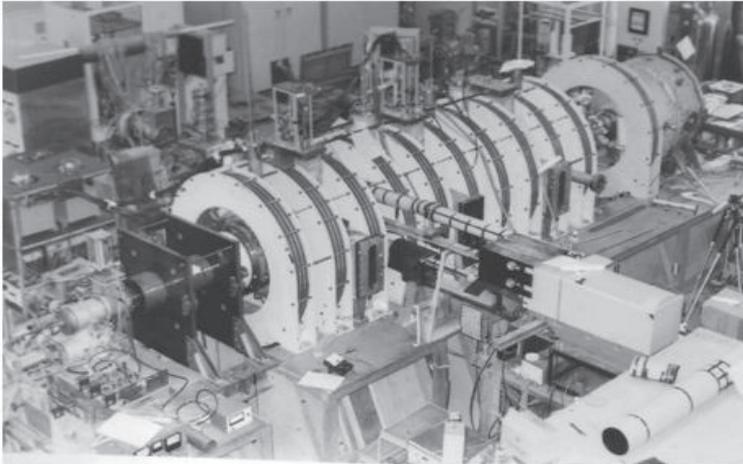


QP (quiet plasma) 装置：長尾重夫、宮原昭、松浦清剛、黒田勉、佐藤照幸、遠山・志ほか。一様磁場、一様な空間の下で、波と粒子の相互作用などの基礎物理の解明を目指した。（伏見資料より）

ったため、要素分解的な発想の実験であり、一様磁場中で空間的にも一様な静かなプラズマを対象とした。実際にはプラズマを有限の空間に閉じ込める訳であるので、磁場の勾配や密度勾配を持ったプラズマを対象とした方が良かったであろうが、加熱も閉じ込めも一緒に行うのではなく個々の要素に分解して理解すれば、全体として理解出来ると考えたよ

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

うである。しかしながら、この結果、1960年代のプラズマ研は閉じ込め研究において世界から遅れることになり、平行して閉じ込め実験を如何に立ち上げるかに苦心することになる。理論のテーマも閉じ込めとの関連は少なかった。ここで、「閉じ込め研究」と言っているのは核融合研究と同義語であり、MHD 安定性や微視的不安定性とプラズマのエネルギー・粒子輸送との関連を研究することであり、その目的に適した閉じ込め装置の建設も含まれる。プラズマ研創立後まもなく運営委員会などにおいて将来計画が議論になる。その候補として、BSG が当時日大の内田岱二郎と浜田繁雄によって提案され、また、京大において実験が続けられ



BSG (本格的スタートは1964年から): 内田岱二郎 (1963年助教授として採用、1971年教授昇進後1973年に東大・工に移る)、宮本健郎 (1964年1月助教授として採用、1972年教授昇進後1979年に東大・理に移る)、藤田順治 (1964年2月助教授)、井上信幸 (1963年10月助手)、浜田繁雄、鈴木康夫、アダチケイゾー、川崎温ほか。ショック加熱などの基礎物理の解明を目指す。(伏見資料より)

てきたヘリオトロン路線の発展としてのヘリオトロンC (前出の写真) が宇尾光治によって提案された。結果として、BSG が採用され、ヘリオトロンC はプラズマ研との共同研究として京都大学において実施されることになった。内田は宮本健郎ほかをスカウトし BSG グループを構成した。

第2章 基盤機関の成立史

内田と宮本は後に各々CCTとJIPP-1ステラレータを建設し、プラズマ研において本格的な閉じ込め実験研究を開始することになる。ジュネーブ会議から核融合が独立したため、核融合にとってジュネーブ会議は重要でなくなったが、第3回ジュネーブ会議が1964年に開催され、日本からは、一本松珠璣（原発社長）、駒形作次（原子力委員）、高島領事、向坊隆（東大教授）、木村毅一（京大原子炉実験所長）、伏見康治、井上五郎（中電会長）、今井美材（原燃理事長）が出席した。核融合に関しては、各国の研究のoverview報告が行われ、伏見所長はプラズマ研の研究方針を紹介した。米国からの報告には、大河千弘のD.C. Octopoleも含まれていた。

日本原子力研究所における核融合研究の始まり

日本原子力研究所は1955年11月に財団法人として設立され、特殊法人となったのは1956年6月である。初代理事長は安川第五郎である。1957年4月に東海研究所が作られた。1958年に原子力委員会・核融合専門部会によって研究グループ立ち上げの提言があった。1958年からの予備的研究の後、1961年度より東海研物理部において実験が開始される。核融合・直接発電研究準備室が作られた。前述したように1959年に原研にB計画を推進するために核融合研究委員会（山本賢三、森茂）が置かれた。嵯峨根遼吉によれば、役所の「お墨付き」があるので、時期がくればB計画は実施されるという認識はあったとのことである。

原研における当時の研究テーマは「核融合研究の歴史 委託調査報告書」（西尾成子、1995年2月）によると、1960年度は、吉川庄一「Hollow cathode discharge」、笹倉浩、市川芳彦「プラズマ内の輸送現象」、田中正俊「プラズマ内の excitation」、1961年度は、核融合・直接発電研究準備室「プラズマ・ガン試作研究」、「直接発電に関する研究」、1962年度は、核融合・直接発電研究準備室「プラズマ入射方式による核融合の研究」が実施された。1962-1966年度には、日大理工に委託調査、「波動現象不安定性」、「衝撃波」、「乱流理論」、「非線形現象」、「分光測定」、「プ

ラズマ計測」が出された。委託調査ではあるが、閉じ込めに関連した研究も行われた。

名大プラズマ研における閉じ込め研究の開始

A 計画に基づくプラズマ研の QP, TP, BSG の実験はプラズマを基礎から調べるといふ「要素還元的な」姿勢で立案・実施された。「閉じ込め」研究は常に頭にあったと考えられるが、しばらくは着手されなかった。理論においても閉じ込めを対象とするものは少なかった。筆者には、1960年代（その後もであるが）のプラズマ研にはアイデアや独創性を重視したため、外国の装置の導入は物まねであり、そのような装置での実験をはばかる機運があったことがその一つの原因であったと理解している。開発目的を持った基礎研究における永遠のテーマであろう。プラズマ研の動向と歩調を合わせた訳ではないが、当時の日本における閉じ込め実験は何をやってもうまくいかなかった。1963年11月21日の第28回融特委では、「将来計画の見通しについて関係官庁との交渉結果」、「特定研究後の方策」が議論された。ミラー磁場に関する国際会議（パリ会議）に出席した池上英雄は、「日本は核融合から目をそらしている」と報告している。1964年3月30日の第29回融特委では、「プラズマ・核融合の現状—中間報告—」が出され、1964年8月5日の第30回融特委では、「将来計画の今後の具体案について討論」、「原子力局より委託研究の打ち切りの打診」が議論された。後に3社（日立、東芝、三菱）は手を引くことになる。1964年12月17日の第31回融特委では、嵯峨根委員長の次のような問題提起が行われている。即ち、「核融合の研究の境界条件は諸外国の例でも分かるように先行き明るい材料は少ないようである・・・将来計画の目標も明確に示さないで単にこういうことをやりたいというだけでは霜が降る。核融合の遠ざかった現在、簡単には予算が取れない」である。前にも述べたように、この時期、霜降り期と呼ばれた。関口忠によると、他分野からの批判もこの頃（1965年頃）極めて厳しく、「鐘や太鼓の鳴り物入りで始まったが、研究が進んでいない。使う研究費の割

第2章 基盤機関の成立史

には成果が上がっていない」とのことであった。

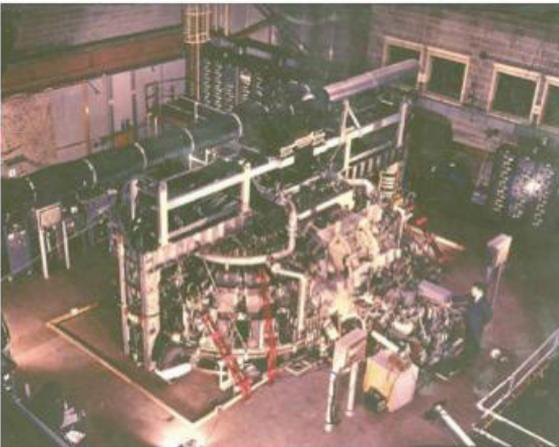
1965年9月の第2回IAEAカラム会議が転機となった。長尾重夫を団長とし、寺嶋由之介、伊藤博、森茂、ほかが参加した。この会議では、大河トラス（多極磁場）が画期的な成果を発表し、Ioffe-bar付きミラ



Octopole 実験装置の大河千弘。写真撮影のためにネクタイをしている。(Dale Meade の ppt (April, 2009) より引用)

一も前回よりも高い密度において交換型不安定性に対する磁気井戸の有効性を示した。また、T-3 トカマクもボーム時間を克服し、プラズマパラメータも格段に向上するという成果を発表した。ただし、西側特にプリンストンの研究者は疑問を呈した。Culham 研究所の D. C. Robinson が実際に電子温度 1000 万度を T-3 において確認したのは 1969 年 8 月になる。関口忠によると、「・・・さきに話しました”お叱り事件”のおかげで、今度の会議（注：カラム会議のこと）には出席者一同緊張しており、高温プラズマの安定化制御がいよいよ軌道に乗りかけてきたことがはっきり印象づけられましたので、わが国もこの時点で質的転換を図る必要があることを確信して将来計画小委員会を組織し、計画案作成の作業にかかった次第です。・・・」と嵯峨根遼吉記念文集の中で述べている。しかしながら、プラズマ研究所では、閉じ込め研究開始に向かったの苦

悩が続く。1965年12月の第22回プラズマ研運営委員会では、「問題点についての討論」及び「問題点のとりまとめ」が議題として掲げられ、「プラズマ研は核融合を目標としていた。閉じ込めはヘリオトロン（ヘリオトロン C、プラズマ研共同研究）のみになっている。研究所全体として核融合という方向に向かっていることが望ましい」との意見が出され、多くの賛同を得た。次に述べる1966年にPPLで行われたトーラス会議の時と考えられるが、伏見所長は「日本の核融合研究は石器時代」と発言し、その場に居合わせた飯吉厚夫は驚いたと述懐している。カラム会議で発表された成果によって展望が開かれたため、世界の閉じ込め研究者は1966年にPPLにおいてトーラス会議を開催した。そこには、世界の主要なトロイダル磁場閉じ込め研究者が集まる。在米の大河千弘、吉川庄一の他、日本からは、伏見所長、天野恒雄、飯吉厚夫、ほかである。外国人では、D. W. Kerst, M. Gottlieb, N. Rostoker, R. Post, Bishop, J. B. Taylor, A. Schlueter, G. Grieger, D. Eckhartt, P. H. Rebut, M. Trocheris, M. A. Leontovich, V. D. Shafranov, V. S. Strelkov, M. S.



Rabinovich ほか
 錚々たる顔ぶれである。話題の中心はC-ステラレータ、トカマク、ヴェンデルシュタイン、RFP、ミラーであったと考えられる。新しい磁場配位として、吉川の Spherator が

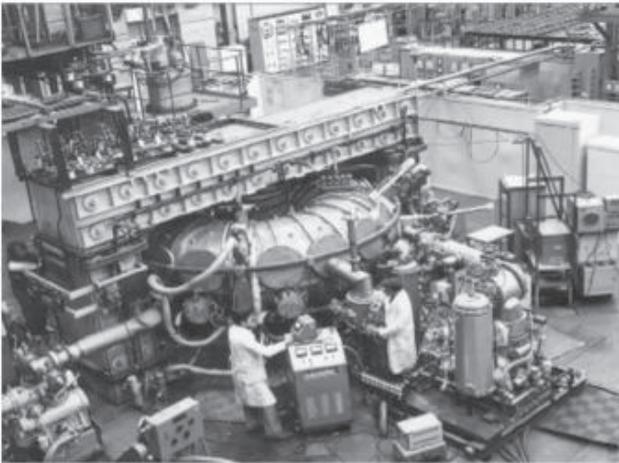
C ステラレータ (Model C Stellarator) : 真空容器は Race-track 形状。磁場の精度が悪い。ボーム拡散を超えることが出来なかった。温度 100 万度程度。

紹介されている。これは、内部導体系で華々しい成果を出した大河の Octopole と異なるアイデアを出すようにとの所長の Gottlieb の指示に

第2章 基盤機関の成立史

より考え出されたものである。この磁場配位には、磁気面上で磁場強度がほぼ等しいこと（これが実現されるとトーラス効果による新古典拡散がゼロになる。しかし、内部導体でないと不可能）の他に、捕捉粒子不安定性を安定にするための $\max. J$ の考え方が含まれている。

閉じ込め研究に関する世界の状況を反映して、1966年12月のプラズマ研第28回運営委員会では、「いずれにせよ高温発生部門は新しい手を持つべき時期」との判断で、大河千弘を教授として呼び戻す可能性が出ていた。これは、運営委員会の頭越しの話であったため、議論を呼び紛糾することになるが、伏見所長は閉じ込め研究を真剣に考えていたことが伺える。伏見所長は1968年8月の第3回 IAEA Novosibirsk 会議に出席せずプラズマ研における閉じ込め研究をどのように進めるべきかを熟慮した。この Novosibirsk 会議における日本からの発表は、QP における加熱、BSG におけるショック加熱、TPM における統計加熱、コニカルピンチガンプラズマのカスプへの入射（阪大）、テータピンチ（日大）等であったが、残念ながら世界の趨勢から外れていた。



ソ連の T-3, TM-3 トカマクの成果については、特に PPL の H. Furth と W. Stodiek は信用せず、反磁性測定は逃走電子の影響を受けた可能性がある

T-3 トカマク：後日、トムソン散乱による電子温度測定のために真空容器に孔をあける。

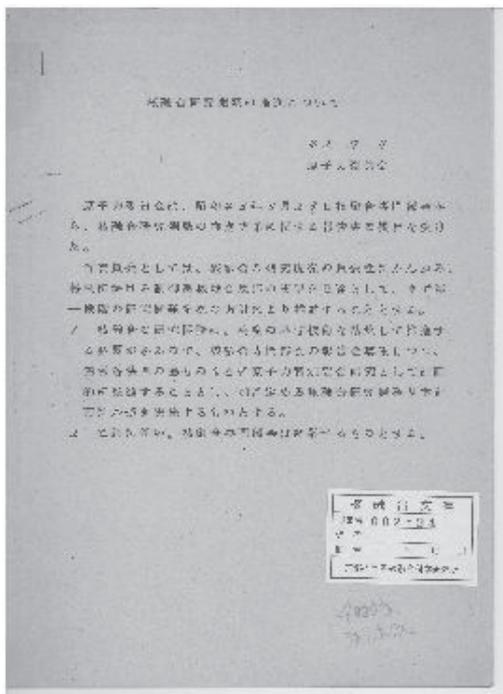
と考えていた。Kurchatov 研(K. I.) と Culham 研は、1956年にクルチャトフが Harwell 研を訪問したように、当初から良好な関係にあり、K. I. の

L. Artsimovich と Culham 研所長の R. S. Pease は、Culham 研から汽車で測定機材を運び、電子温度のトムソン散乱を行うことで合意した。1969 年に D. C. Robinson たちが測定を行った結果、ソ連のデータが正しかったことが証明され、トカマクの成果が世界的に確定する。これは、Pease にとっても起死回生の出来事であり、ZETA で地に落ちた威信を回復することになった。これにより、世界的にトカマクブームが起り、C-Stellarator は 1970 年に ST(Symmetric Tokamak) に転換され、JFT-2(JAERI), Doublet (GA), ORMAK (ORNL), Alcator (MIT), Pulsator (Max-Planck Institute), ASDEX (MPI), TFR (Fontenay aux Roses), DITE (Culham), FT (Frascati) など第一世代のトカマクが建設された。

プラズマ研の閉じ込め計画の立案努力と並行して、官の委員会レベルでも核融合の将来計画が議論された。1964 年 9 月の第 31 回学術会議・融特委では山本賢三を委員長とする将来計画小委員会が立ち上がり、試案「プラズマ核融合研究の進め方についての基本的考え」が出され、1 億円規模の高温プラズマ実験が想定された。1965 年 4 月 15 日の第 32 回融特委では「プラズマ核融合将来計画(第 1 次案)」が出され、次いで、1965 年 6 月 9 日の第 33 回融特委では関口忠が委員長となり、新将来計画小委員会が組織された。カラム会議の結果により先に述べたように進むべき方向性が見えたため、1965 年 12 月 9 日の第 1 回新将来計画小委員会では、「総合装置的アプローチ」と「物理主義的アプローチ」との協調の必要性が謳われ、この考え方についてのコミュニティの合意を得るべく、核融合懇談会への情報発信のため「核融合・プラズマ研究白書」が配布された。1966 年 1 月 27, 28 日の第 2 回新将来計画小委員会では、「プラズマ研の性格は物理主義的」と位置づけられた。その後、1966 年 6 月 25 日の第 36 回融特委と第 1 回力特委・核融合部会においても議論が続けられた。1966 年 8 月 2 日の「プラズマ若手グループ新研究体制に関する討論会」が開催され、大学院生を含めた将来計画の議論が行われた。このような大学院生を含めた議論の場は、筆者の知る限りその後設けられていない。1966 年 10 月 4 日の第 2 回核融合部会では、「プラズマ核融合将来計画(第

第2章 基盤機関の成立史

2次案)」が出され、高エネルギー粒子注入型、テータピンチ型、平均極小磁場配位トラス型が候補になった。1966年9月頃の原子力委員会・長期計画専門部会・核融合分科会（主査駒形作次、嵯峨根遼吉（主査代理））の後、12月21日に専門部会長に「プラズマ現象を幅広く研究し、その理解を深め核融合制御の原理を探求する研究は、主として大学、名古屋大学プラズマ研究所に期待する。総合装置のプロジェクト研究は、



主として原子力予算関係試験研究機関において推進するものとする。」とした報告書を出している。文部省と科技厅との棲み分けが明確になされた。1967年5月25日に原子力委員会に核融合専門部会(第2次)が設置され、研究小委員会も設置された。これらの議論を経て、1968年7月4日に核融合は原子力特定総合研究に指定され、「第1段階核融合研究開発基本計画(1969-1973年)」

(歴史的資料5、ID番号：002-24)が策定されることになる。これは日本の核融合研究にとって大きなステップである。日本の動向に大きな影響を与えたのは、大河千弘と吉川庄一であり、二人の見解やコメントを紹介する。1967年3月の第29回プラズマ研運営委員会において、1967年1月30日付け吉川書簡(核融合研究 Vol. 18, No. 3)が紹介された。そこでは、米国における内部導体系の動向を紹介すると共に、日本も今か

ら閉じ込め研究を始めるなら間に合うと意見が述べられた。それを踏まえて、伏見所長は、「現在、プラズマ研で閉じ込めを考える時期に来ていると判断出来る。その際の有力な候補者の一人としてお考えいただきたい」と発言している。また、同年 11 月に大河と吉川は日本側の招きで来日し、日本の核融合研究に対して助言を行ったが、プラズマ研に対する辛口コメントも残している。その記録は「核融合研究」第 21 巻別冊（'68）p. 81 に掲載されている。そこでは、

大河・・・プラズマ研究所の設立へと結晶した。あの時の情勢としては大型装置という考え方を止めて基礎実験と中型装置を選んだことは正しかったと思われる。その内基礎実験の方は、大きな成果を上げ、日本のプラズマ研究の level up に大きな寄与をした。しかし中型装置による実験はプラズマの confinement 研究でなかったため、世界の研究の主流になるに至らなかった。・・・

吉川・・・あいにくと日本においては、過去において核融合関係の実験がなかったため、プラズマ研究者の興味が、プラズマの安定性・平衡等の核融合装置の実現に不可欠のものから外れていた恐れがあります。・・・

また、プラズマ研究所 10 年のあゆみに、当時の状況に関する感想が記録されている。寺嶋由之介は「トーラス計画のいきさつ」の中で、・・・もともと、研究所創設当時よりトーラスによる閉じ込め研究は多くの人々の念頭にあった。・・・QP 計画が出発して間もなく次の計画が問題になった。・・・検討を依頼されたのは高温発生専門委員会で、・・・専門委は公募案を検討し、まず、BSG とヘリオトロンに絞り、・・・要するにプラズマ研はトーラスと全く無縁ではなかったのである。・・・68 年 3 月になると QP, BSG の終結問題の議論が加速度的に盛んになった。当時の高発（高温発生）専門委員会では、宇尾教授が中心になって、新たな研究計画が立案された。公募の結果挙げられた候補は、イ）付加磁界を持つ四極磁界計画、ロ）平均極小磁界の一案（いわゆる生田トーラス）、ハ）ハードコア・テータピンチであった。・・・

第2章 基盤機関の成立史

宇尾光治は「ヘリオトロン C の建設」の中で、・・・プラズマ研究所では将来計画として斬新に富んだアイデアを公募しておったので、京大の林重憲教授を中心としたヘリコングループはヘリオトロン計画を立案し応募した。・・・結論として、ヘリオトロン計画は人及び設備の節約等を考えて実験場所は京大でやることが決まり、ヘリオトロン study group なるものが結成され、・・・ヘリオトロン C の実験は、主として強いジュール加熱電流の流れているトロイダルプラズマのヘリオトロン磁場中での振舞を調べるにおかれたのであるが、プラズマ閉じ込めに関しては、ボーム閉じ込め時間の程度を出ることができなかった。しかし、このトロイダルプラズマの実験が基礎となり、カスプ損失を防ぐためと、磁気井戸を作るために、ヘリオトロン磁場の負コイルをプラズマ中に浸して、一種の内部導体系（正確には内部複合系）閉じ込め磁場、ポロイダルヘリオトロンの実験に進み、更にはヘリカルヘリオトロン磁場を用いたヘリオトロン D 装置の実験へと発展してきたのである。・・・

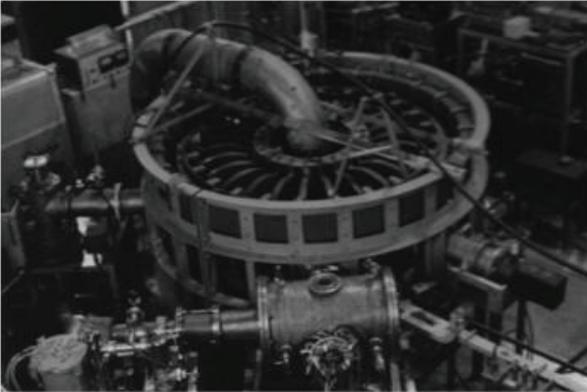
内田岱二郎は「BSG」の中で、・・・68年1月BSGグループのメンバー全員が所長室に呼ばれて、”直ちに閉じ込め研究に着手せよ”と訓示を受けたとき、いかんともなし難い研究の流れというものを思った。・・・時の世論は要するに、プラ研で閉じ込めの実験、即ち直接、核融合に向かった実験が行われなかったことに対する率直な不満であり、焦りであったと理解するのが正しいと思う。・・・

宮本健郎は、・・・Novosibirsk 国際会議が終わった当時、プラズマ研究所では、再編成の動きが進行中で、・・・生田君が直線ヘリカル磁場の・・・私もこれらの研究に興味を引かれ、これらの磁場構成の性質を調べた。しかし、磁気井戸を深くできても、回転変換角を大きくすることができないことが判った。・・・さて回転変換角の大きくとれる外部導体系によるトーラス磁場配位を探すと、どうしてもステラレータ磁場或いはその変形と考えられるトルサトロン磁場になる。・・・

以上のような経緯を経て、日本においても本格的な閉じ込め研究が

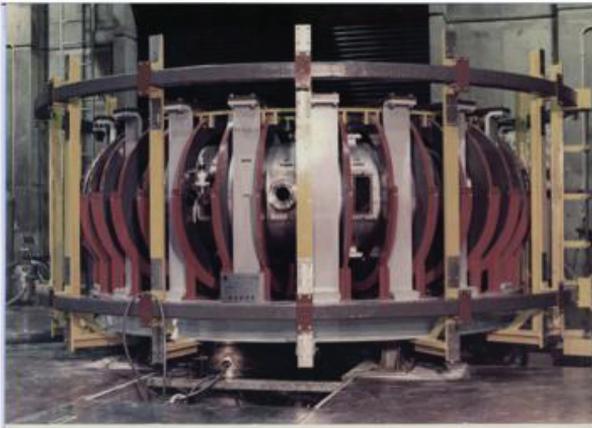
核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

始まった。プラズマ研では、JIPP-1 ステラレータ（ $1=2+1=3$ の標準的なステラレータ）と磁気井戸を取り入れた CCT（Calked Cusp Torus、



トロイダルピンチ + 内部導体リング)、京大ヘリオトロンではヘリオトロン D(ヘリカルヘリオトロン)、原研では、JFT-1 (内部導体・ヘキサポール) が建設された。

JIPP-1 ステラレータ：宮本健郎、藤原正巳ほか。1=3 から後に $1=3+1=2$ となった。空芯コイルによる OH 加熱。これは、鉄心を使うことによる誤差磁場を心配したためである。（伏見資料より）



これらの装置からの実験結果は、1971 年 6 月の第 4 回 IAEA マディソン会議で発表され、日本は世界の閉じ込め研究の仲間入りをすることになる。

ヘリオトロン D：宇尾光治、本島修ほか。ヘリオトロンシリーズで最初のヘリカルヘリオトロン。ヘリカルコイルは真空容器内に設置された。（本島修氏より）

その後、先に述べたように、原研では JFT-2 トカマクが 1972 年に完成し、

第2章 基盤機関の成立史

世界のトカマクの仲間入りを果たした。以上のような閉じ込め研究の成果が世界に認められ、第5回 IAEA 会議 は日本（東京）で初めて1974年



に開催された。IAEA 東京会議における日本からの発表は、JFT-2, JFT-2a, JIPP-1, CCT, STP, TPD-II, Heliotron D, ETL TPE-1, 阪大レーザー、

第5回 IAEA 会議。品川の高輪プリンスホテルにて1974年11月11～15日。(寺嶋由之介氏より)

阪大圧縮加熱、ほか多彩であった。外国からは、第一世代のトカマク TFR, ST, ATC, ORMAK, ALCATOR, Doublet-II, -IIA, T-6, Pulsator, や内部導体系の GA Octopole, ステラレータ W-IIb, CLEO, バンピートーラス EBT ほかの発表があった。会議の目玉は TFR トカマク（フランス）であった。

文部省と科技庁の棲み分けがなされ、エネルギー開発の立場を採る原研は、トカマクが最先端のパラメータを出しているためトカマク路線を採用し、JFT-2 以後、JFT-2a, JFT-2M と物理実験のステップを踏みつつ大型トカマク JT-60 に到る。エネルギー閉じ込め時間は大雑把に言えば実空間での拡散できまっているので、装置の大型化によって閉じ込め時間が長くなるのが背景にある。1970年代は加熱パワーを増力してプラズマパラメータの向上を図ったが、エネルギー閉じ込め時間が加熱パワーと共に悪くなる L モードという困難に直面した。1982年に ASDEX で閉じ込め時間が2倍になる H モードが発見されて、核融合炉心プラズマに向けて明るい見通しが得られた。一度見つかると殆ど全てのトカマクでも

見いだされた。Hモードはしばらくして、ヘリカルプラズマにおいても発見される。原研はエネルギー開発の使命を背負ってその苦労は並大抵ではないと推測されるが、これまでに路線の選択に伴う苦労に悩まされることはなかったと考えられる。一方、プラズマ研は苦しい立場に立つことになる。因に、筆者の上司であった宮本健郎氏は常にプラズマ研の将来計画を意識し、プラズマ研と似た立場にあるプリンストン（PPPL）の動向を気にかけていた。プラズマ研でトカマクを造るにしても、原研とパラメータ競争をする訳にはいかないので、何か新しい学術的な見地からの研究とならざるを得ない。このため、装置としてもトカマクの代替路線を採用することが多くなる。更に、学術研究をトラスプラズマについて行うには、トカマク、ヘリカル型に限らず、加熱によって新しいパラメータ領域を開拓すると同時に、プラズマパラメータの空間分布を十分な時間・空間分解能で測定しないと物理の解明につながる議論が出来ない。即ち、加熱・計測の開発は本質的な役割を担う。しかしながら、日本の研究者の人数は米国と比べて数分の一から十分の一であり、加熱・計測の人手不足は（現在でも）明らかである。装置本体の建設については、幸い日本には優秀な企業が控えている。次に述べる JIPP T-II 担当の助手として採用された筆者は、当初装置建設に従事したが、人手不足を感じながらも企業の協力の結果、工学的には立派な装置が出来上がった。筆者は、加熱・計測が閉じ込め物理の解明に役立つ状態になったのは 1990 年代に入ってからであると考えている。それまでは、本格的な閉じ込め実験装置は出来たものの、閉じ込め物理解明の点で困難な時代が続くことになる。

プラズマ研のその後であるが、先ほど述べたように、第二次計画が 1974 年度から具体化され、ステラレータ・トカマクのハイブリッドである JIPP T-II（次ページの写真）が主装置として 1976 年に完成する。この計画には、当時原研で JFT-2 を建設した伊藤智之とプラズマ研で JIPP-1 ステラレータを担った宮本健郎の両氏が参加した。トカマクとしての主な研究目的は、抵抗性シェルの下でのプラズマ位置のフィードバ

第2章 基盤機関の成立史

ック制御にあった。当時は電気伝導度のよい銅のシェルでプラズマを取り囲み受動的な位置制御が行われていたが、ポートとの干渉（ポートの部分はシェルが欠如する）があった。厚み 35mm のステンレス鋼のヘリカルコイルの巻き枠を抵抗性シェルと見立ててプラズマの能動的な位置制御を行った。このテーマは一言で言えば工学的なテーマである。トカマクプラズマの断面は円形で、物理的な特徴を出すことは難しかった。



ステラレータとしても $1=2$ の標準タイプであった。同じ装置でトカマクとステラレータの両方のプラズマの比較が出来ることが

JIPP T-II：松浦清剛、宮本健郎（1979年9月から東大理）、伊藤智之（1978年11月から九大）、宮原昭、黒田勉、藤田順治、濱田泰司、藤原正巳、松岡啓介、東井和夫、大久保邦三、寺嶋由之介、天野恒雄ほか。

謳い文句であったが、どちらかにしないと特徴を出しにくい。この時期、大電力加熱及び空間分布計測は世界的に見ても発展途上であり、世界の先頭を切って、加熱・計測を開発するだけのマンパワーは無かったため、加熱パワー（NBI, LHH, ECH）は 100kW 程度で世界のレベルと比べて低く、分布計測はルビーレーザーのトムソン散乱による電子温度のみ可能で、1ショットで空間1点の温度が得られる状況であった。その他の計測は、プラズマパラメータの空間分布を測定出来なかった。加熱のデポジション分布が得られるようになったのも後のことであるので、エネルギー輸送係数の空間分布を求めるところまでは行かなかった。ステラレータの特長である無電流プラズマの実現では、W7-A（オーミック生成プラズマから電流を減衰させると共にNBIによる加熱によってプラズマを保持し、

最終的に無電流プラズマを得た。1982年）、ヘリオトロンE（ジャイロトロンによるプラズマ生成。1982年）に先を越されたのは残念である。JIPP T-IIのデータは閉じ込め時間のスケーリング則（世界の装置からの実験データを集めて経験則を導出）に引用されていないとの意見があり、当事者の一人として肩身の狭い思いをした。この時期は、日本においては本格的なトカマクやステラレータを建設し、ジュール加熱によって1000～2000万度の電子温度を持つプラズマを生成したことに意義があったと考えている。将来の発展のための助走期間と位置づけられる。

1973年4月から高山一男教授が所長に就任した。高山所長はトカマクやステラレータのような世界で研究対象となっているオーソドックスな閉じ込め装置よりは独創性やアイデアを強調された。これは大学の研究者としての宿命であろう。が、外部からこれらの独創性について疑念の声を聞いたことがある。ともあれ、プラズマ研には色々なアイデアに基づいて、RFC-XX（ダブルカスプ磁場＋高周波封じ込め、1978年）、NBT（バンピートラス）、STP（トロイダルピンチ）、SPAC（相対論的電子ビームによるトロイダル磁場配位の形成と閉じ込め）、シンクロマック（高周波による電流駆動）などの装置が造られた。これら装置の予算は少なくなかったので、参考文献（西川恭治氏）にあるように世間の風当たりが強かったようである。新しい閉じ込め方式を目指したものの、世界の閉じ込め研究にインパクトを与えるような成果を出すに至っておらず、1967年のプラズマ研に対する大河・吉川コメントがそのまま生きていた感じがする。これらの装置の実験について歴史を調べ、学術的な成果をきちんと評価し後世に残す必要がある。

1970年代のプラズマ研以外の状況を簡単に述べる。世界的にトカマクブームが巻き起こり、沢山のトカマクが造られた。ST (Symmetric Tokamak, PPPL, 1970) は C Stellarator から転換された標準的な装置であることは既に述べた。ORMAK (Oak Ridge, 1971) は装置が真空タンクに内蔵されているが、特に特徴はない。Doublet (GA・大河千弘, 1971) はダブルットと呼ばれる一風変わった非円形断面を持つトカマクである。ATC

第2章 基盤機関の成立史

(PPPL, 1972)はプラズマを主半径方向に断熱圧縮する加熱が目的である。Alcator-A (MIT, 1972) は強磁場路線を採用した。JFT-2 (1972) は dynamic limiter によって真空容器から浮いたプラズマを目指した。JFT-2a (1974) は poloidal divertor を持つ。当初、不純物対策として真空容器内面は金でコーティングされたが、実験結果は輻射損失大で取りやめになった。TFR (Fontenay-aux-Roses, 1973)は当時世界最強装置であった。パワフルなプラズマを宣伝したが、トロイダル磁場のリップルに捕捉された高エネルギー電子による熱負荷により真空容器に穴をあけた。Pulsator (Garching, 1973)は MHD 不安定性を共鳴ヘリカルコイルによって安定化させる実験を行った。この方式はその後いくつかの装置で採用された。一方、Stellarator ほかの路線の装置は、W7-A (Max-Planck Institute, 1975) のプラズマは $R/a=2m/10cm$ (R はプラズマの主半径、 a は平均の小半径) に示されるように、非常に細長い。これは、直線でしか実現しないヘリカル対称性に近づけるためである。磁場の強さに対称性が存在すると概略閉じ込めが良いと考えてよい。Heliotron E (京大ヘリオトロン核融合研究センター、1980)のプラズマは $R/a=2.2m/20cm$ で W7-A よりは太い。Wendelstein 7-AS (MPI, 1988)のプラズマは、 $R/a=2m/20cm$ であり、磁場配位は Pfirsch-Schleuter (P-S) 電流の最小化を目指した。P-S 電流が大きいと拡散が大きいと考えてよい。W7-AS はヘリカル磁場配位の最適化の先駆け装置である。ATF (Advanced Toroidal Facility, ORNL, 1987、次ページの写真) のプラズマは $R/a=2.1m/30cm$ で更に太くなった。ATF は Heliotron E, W7-A, L-2 (GPI (一般物理研究所), ソ連)の実験データに基づいて建設された。EBT (ORNL, 1973)はバンピートーラスで NBT の兄貴分である。ミラーやカスプでは、Baseball (LLNL, 1966)、GAMMA-6 (筑波大プラズマ研究センター, 1978), GAMMA-10 (1982、電場の効果)、TARA (Wisconsin, MIT, 1984)、TMX, TMX-U (LLNL, 1982)、MX がある。MFTF-B (LLNL, 1985)は超伝導装置であるが、完成と同時にシャットダウンされた。反転磁場ピンチでは、ZETA (Culham, 1954)、Syllac (LANL, 1971)、ZT-40 (LANL, 1981)がある。独創的な装置として、S-1

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

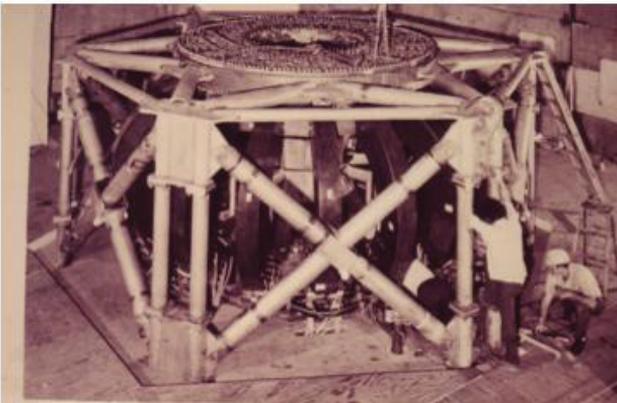
Spheromak (PPPL, 1981)がある。これはPPPLの当時の所長H. Furthの肝いりで考案されたもので、トロイダル磁場コイルが無い



真空容器の中にトロイダルプラズマが鎖交せずに生成されている。阪大レーザー核融合研究センターではレーザー核融合を中心とした慣性核融合の実現を目指し、世界的に

ATF (Advanced Toroidal Facility) 1987年完成当時は世界最強のヘリカル装置。誤差磁場がひどく運転期間は10年未満。

インパクトのある成果を出した。トカマクは順調に発展を続け、第二世代トカマクとして次に述べる装置が建設された。加熱を強化してプラズ



マパラメータを上昇させること、分布計測を充実させること、欠点と言われた定常化を電流駆動によって実現すること、ダイバータの効果を

PLT (Princeton Large Torus) : 円形断面のオーソドックスなトカマクであるが、強力な中性粒子入射加熱を行い、7keV という1980年当時としては驚異的な高イオン温度を達成した。(高山一男資料より)

第2章 基盤機関の成立史

調べる事等が行われた。PLT (PPPL, 1975)ではNBI(中性粒子入射加熱)により7keVのイオン温度を達成し、世界をアッとさせた。T-10 (KI, 1976)はこれと言った特徴が無い。ISX (ORNL, 1977)は不純物に特化した研究を行った。D-IIA (GA, 1975)は銅のシェルを用いた断面制御のため、シェルに大きな孔を開ける訳にはいかず計測用のポートの孔は極めて小さい。加熱・計測に支障がでるため、次の段階として銅のシェルの代わりにポロイダルコイル群による制御を行う。しかし、ダブレット形状の制御が簡単ではなかったためと考えられるが、最後はD型(D-IIID)になる。DITE (Culham, 1976)は熱処理用のスペースを十分に確保することを目的としてトロイダルダイバータの配位を採用した。NBIによる電流駆動を行い、大河千弘の理論と合うことを示した。PDX (PPPL, 1980)ポロイダルダイバータ付きの装置である。ASDEX (MPI, 1981)では先に述べたようにHモードが発見された。ALCATOR C (MIT, 1984)では引き続き高磁場路線での実験が、JFT-2M (JAERI, 1983)ではHモードの研究が行われた。

大学における多岐路線と集中化

プラズマ研究所の第三次計画(主装置として核反応プラズマ実験計画、通称R計画)から核融合科学研究所の設立に至る経緯については、西川氏の参考文献に詳しいが、筆者は(繰り返しになるが)1974年に第二次計画の主計画であったJIPP T-II担当の助手としてプラズマ研に就職した後、第三次計画の主計画であった核反応プラズマ計画(R (Reacting Plasma)計画)の本体設計グループ、学術審議会・特定研究領域推進分科会・核融合部会が設置した次期大型ヘリカル装置の設計グループ(設計部会)に名前を連ねたので、その現場に身を置いた者として経緯を記述する。

プラズマ研究所第二次計画が始まった1974年には既に日本学術会議原子力研究連絡委員会核融合小委員会において、核融合・プラズマの将来計画が議論され、1974年9月には全国共同利用研究所としての「核融

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

合理工学研究所（仮称）」設立趣意書（案）が作成され公表された。1975年3月の学術会議原子力連絡委核融合小委において「核融合研究開発の展望と計画」第1, 2部が発表されたが、この報告書にプラズマ研の将来計画が含まれていなかった（実際は別扱いであった）。このため、プラズマ研専門委員会や運営委員会において将来計画の議論が本格化する。

その前の1974年2月に奥野誠亮文部大臣から学術審議会に対する諮問「宇宙科学、核融合、生命科学等特別の振興方策を必要とする分野の研究の推進について」が出され、それに対する1975年10月学術審議会「核融合研究の推進について」答申（歴史的資料6、ID番号：151-31）において、大学の役割として次の3点が指摘された。①プラズマ物理学



等の関連新学問分野の確立、②大学等が擁する豊富な学問分野から学際分野の研究への寄与、③核融合という長期開発に対処するための人材育成。1973年の第一次オイルショックもあり、核融合に対する世間の期待が高まった時期である。1976年5月22日に学術審議会・特定研究領域推進分科会・核融合部会が設置され、伏見康治が部会長となった。部会では、各種小委員会が設置され、プラズマ研の研究企画情報センターと電子

計算機センターがともに1977年に設置された。また、答申により、1976年から1980年にかけてセンター群等（京大、阪大、筑波、九大、東大、広大、東北大、名大）が設立され、各大学における核融合研究の規模が拡大された。これは結果として、予算の膨張を伴うことになった。

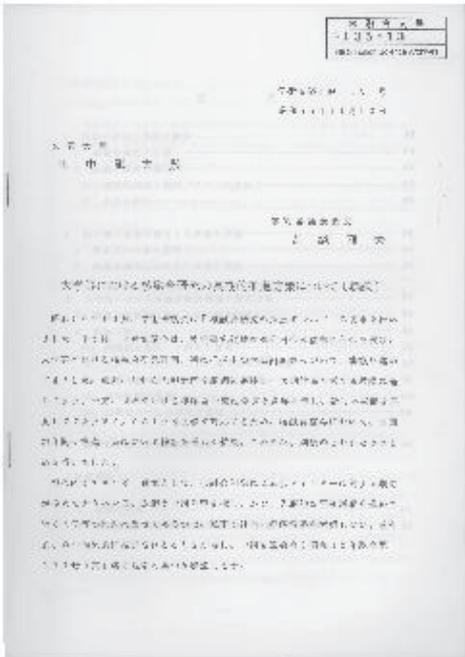
第2章 基盤機関の成立史

1978年7月のプラズマ研運営委員会・将来計画小委員会では第3次計画の基本方針が出され、1978年9月の学術審議会・特定研究領域推進分科会・核融合部会 研究・体制検討小委員会は次期計画作業グループを組織する。主査・内田岱二郎（東大・工）、飯吉厚夫（京大・ヘリオトロン）、池上英雄（プラズマ研）、関口忠（東大・工）、宅間宏（電通大）、田中茂利（京大・理）、築島隆繁（名大・工）、中井貞雄（阪大・レーザー）、西川恭治（広大・理）、吉川允二（原研）ほかがメンバーであった。この頃、学審での意見に「200億円なら物理だけではダメ。魅力・迫力が必要」とあり、大学でも開発研究を行うことが要求されていたことになる。1979年6月の核融合部会において、「核融合研究の今後の推進について（中間とりまとめ）」が出され、核燃焼プラズマの基礎研究、多岐路線の推進、名大プラズマ研を国立大学共同利用研究所として発展させること等が記述されている。このように、プラズマ研の核反応プラズマ計画（R計画）は1979年ごろから検討され始めた。核燃焼プラズマの物理は学術的なテーマであるが、「大学で行うのは学術」という観点からすると、実際には無理が生じた。 Q （加熱入力に対する核融合出力の比） $=0.3$ を目指してトリチウムの導入を計画した結果、低放射化材料（Al合金）を用いたトカマク本体の設計を行った。本体以外では、トリチウム除去装置の設計（天野怨ほか）、遮蔽（本体を囲むイグルー）、遠隔操作、計測窓の放射線損傷対策、等の開発研究を行う必要があった。これらは、むしろ原研で行うテーマであったと言わざるを得ない。

1979年12月に次期計画立案作業グループは「核融合研究の今後の推進について」を出し、1980年1月に核融合部会は「核融合研究の今後の推進について（中間報告）」を出している。学術審議会1980年11月に田中龍夫文部大臣あて建議「大学等における核融合研究の長期的推進方策について」（歴史的資料7、ID番号：135-13、次ページ）を行い、①核燃焼を指向した研究の推進、②トカマクに代わる方式の育成、③広範な関連分野における研究を推進する。科研費「エネルギー特別研究」による総合的組織的な推進を図る、④研究体制の整備、⑤国際協力による研究

の推進、を謳っている。

1980年12月にプラズマ研専門委員会は、「核融合反応プラズマ研究計



画]、「名古屋大学プラズマ研究所第3次計画概要」を発表した。そこでは、主半径2.1m、磁場5Tの円形断面のトカマクを建設し、核燃焼に関する閉じ込め物理の研究を行うことが提案されている。話は前後するが、1980年度からは放射線化学の専門家である垣花秀武・第3代所長を迎え、R計画の推進に力を入れることになる。81年度の概算要求として約400億円を要求した。筆者は、核燃焼実験計画の先輩格にあたるTFTRに1980-1981年の間

滞らし、中性子計測の開発に従事する傍ら、TFTRについて調べた。R計画全体のリーダーは松浦清剛であった。本体設計グループは、浜田泰司をグループリーダーとし、北川史郎、松岡啓介、東井和夫、山崎耕造、小川雄一の6名で構成され、プラズマ物理に立脚したRトカマク本体の設計を懸命に行い、分厚い設計報告書を7冊ほど世に出した。

1982年11月の学術審議会・研究領域推進分科会・核融合部会は核融合研究動向調査ワーキンググループを組織した。部会長は6月から伏見部会長を引き継いだ早川幸男であり、WGメンバーは浅田敏（東海大、東大名誉教授）、石川忠雄（慶応大塾長）、猪瀬博（東大・工）、岡村総吾（東大・工）、内田岱二郎、池上英雄、佐藤徳芳（東北大・工）、犬竹正明（筑波大・プラズマ研究センター）、宮本健郎（東大・理）、中井貞雄、宅間

第2章 基盤機関の成立史

宏、飯吉厚夫、吉川允二ほかであった。「核融合研究における大学等の役割」、「大学等における核融合研究の方策」を議論した。1983年12月の学術審議会・研究領域推進分科会・核融合部会総合会議（10月より設置）においてヒアリングが行われ、ヘリオトロンE、ガンマ10、レーザー、「核反応プラズマ実験計画（R計画）とその準備計画」から報告があった。ここでは、一つに絞らない、数百億なら国立大学共同利用機関のような体制とする、が合意された。この頃の大型装置として、ヘリオトロンE（京大）、レーザー（阪大、激光XII号）、ミラー（筑波大、ガンマ10）が精力的に研究を進めていた。準大型装置として、プラズマ研には既に述べたようにJIPP T-II（1983年にR計画の準備実験装置として円形トカマクJIPP T-IIUに改造される。JIPP T-IIUは1995年にシャットダウンとなる）、RFC-XX、NBT、SPAC、STP-3が実験を行っていた。他に、TRIAM（九大、NbSn超伝導コイルのトカマク、長時間運転の世界記録を樹立）、WT-2、-3（京大理、オーミック電流無し（非誘導）でプラズマ立ち上げを世界で最初に行ったトカマク）がトカマクの欠点を補う成果を出していた。1980年（昭和55年）の学審建議にあるように核融合は拡大路線にあった。

1984年11月に学術審議会・研究領域推進分科会・核融合部会総合会議は「大学における大型装置による核融合研究の在り方に関する基本方針」（歴史的資料8、調査中）を出し、そこでは、「現在実施中の各種閉じ込め方式の研究成果を世界的視野で位置づけ、今後解決すべき問題点を学問的に整理統合して研究課題を明確にする。この研究課題の探求のためには、現有装置を最大限に活用する事とするが、必要とされる新たな大型装置については、各種閉じ込め方式の成果を十分検討の上、上記研究課題の探求に最も適したものを土岐市に建設する」を決定した。設計グループの会合に出席していた筆者は、手書きのメモ（B5サイズ）のコピーが配布され、その旨の説明があったことを「あー、いよいよサイトが決まったか」とはっきりと記憶している。

早川部会長はワーキンググループを組織し、主査を宅間宏とし、サブ

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

グループとして、AT（先進内部電流系、主査：藤田順治（プラズマ研）、副査：宮本健郎）、HS（ヘリカル系、主査：宮本健郎、副査：池上英雄（プラズマ研）、藤原正巳と松岡もこのメンバー）、OS（オープン系、主査：池上英雄、副査：西川恭治）、IC（慣性核融合、主査：西川恭治、副査：宅間宏）の4つを組織した。メンバーは、利益代表の立場を採らず、大学の大型装置による核融合研究の在り方に関する基本的合意の具体化のため、各種方式による研究成果、今後の研究課題、新大型研究計画の必要性和その在り方等を、純粋に学問的に議論した。当時は（今でも）多岐路線であり、メンバーの所属する機関の実験装置がベストと考えている中で、利益代表の立場を離れて議論したことは、核融合の歴史の中でも特筆すべきことであると考えている。本報告書シリーズの宅間氏の報告も参照願いたい。ATは、大型トカマクとして外国にTFTRとJET、原研にJT-60がある中で、如何に特長を出すかに苦慮した。HSは、実験のデータベース不十分、アスペクト比大のため装置が大きくなる、3次元形状のため理論解析が困難、といった問題があった。W7-AS(MPI)、ATF(ORNL)との国際分業も考慮する必要があった。HSサブグループでは、筆者は立体磁気軸について調査したが、HSでは伊藤公孝（原研）の活躍が目立った。伊藤はワーキンググループ全体の中でもトカマクを推進している原研の立場を離れ、議論をリードした。OSは、ガンマ10（筑波大、1982年）は実験が始まったばかりであったことと関連するコミュニティの人口が少ないという理由で、元々新大型装置の対象外の感があった。米国ではTFTRに期待するあまりMFTF-B計画が1985年に完成と同時に即中止になった。ICは、激光XII号（1982年）も始まったばかりで、コミュニティ全体の計画とはなりにくかった。HS設計グループは1984年12月25日から1985年5月まで会合を5回以上開いた。ワーキンググループは1985年5月に、次期大型装置をHSとする中間報告（歴史的資料9、ID番号：033-10-02、次ページ）をまとめた。

プラズマ研では、1984年度から内田岱二郎・第4代所長が着任した。R計画の当事者（松浦清剛、浜田泰司ほか）は筆者も含め本気で実現を図

第2章 基盤機関の成立史

ったが、トリチウムに対する地元の反対もあり、関係者の努力の甲斐無く、結局、R計画を断念することになり、リーダーの松浦清剛はR計画最終の挨拶状を1985年1月に関係各位に出した。伏見康治はトリチウムを扱うことはたやすくはない旨の意見だったとのことで、結局のところ、プラズマ研の手に負えなかったことになる。話は前後するが、これでR計画が次期計画の候補になることはなくなった。



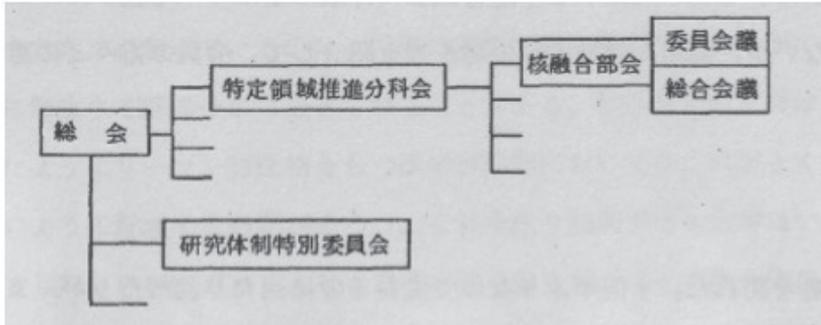
学審における検討の過程で、新大型計画の選択の基本理念として、①核反応プラズマ実験の準備研究として意味があること、②トカマクの炉工学的課題を緩和する上で炉心プラズマに関する知見が得られること、③トカマクを含むこれまでのデータベースが活用可能であること、④予想される研究成果が10年先を見越して斬新であること、⑤大学等における多くの研究者の英知を集めて実りある成果

を生み出す基盤を備えていること、を基本にした比較検討を行うことになった。HSは、ヘリオトロン方式、磁場4T、主半径数mを構想した。ATは、R計画が無くなったため、極端非円形化による高ベータ化、第二安定化領域への遷移、磁場<4T、主半径>1.25mを考えた。R計画が無くなったとしても、筆者自身なんとなくプラズマ研の計画の延長で決着するのではないかという気もしていたが、先に述べたようにHSに決定した。

核融合部会での審議は、1985年5月21日中間報告の説明を受け、質疑がおこなわれ、6月19日と10月15日の部会において、中間報告は基

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

本的に了承された。11月26日の部会総会議では文章化のための原案が作成され、研究・体制特別委員会（下図）の審議に移された後、12月13日の総合部会で承認された。それは、1986年2月14日の学術審議会で正式に承認された。



1985年7月に原子力委員会・核融合会議・核融合開発基本問題検討分科会が設置され、JT-60 臨界プラズマ条件達成後の日本の核融合開発の在り方の骨組みについて検討された。主査は関口忠。そこでは、「大学の研究は、長期的視野に立って基礎的・独創的研究を行うことが期待されている。大学の計画は学術審議会で検討されているが、原研等の研究と調整のとれたものになる必要がある」と述べられ、大学の研究計画の意義がしっかりと認識されている。

1986年4月に学術国際局長裁定で「核融合研究を推進するための調査研究協力者会議」が設置され、早川幸男が主査となった。メンバーは、宇尾光治、内田岱二郎、岡田重文（東大・医）、関口忠、宅間宏、西川恭治、三好昭一（筑波大・プラズマ研究センター）、宮原昭、森茂、山中千代衛（阪大・レーザー）ほか。新機関の組織としては、既存機関とは独立の国立大学共同利用機関とすることを前提とすることが決められた。6月に設計グループが設置された。設計グループは約20名のメンバーで構成された。主査：飯吉厚夫、副査：藤原正巳で、筆者もメンバーに名前を連ねた。会合は京大かプラズマ研において7/1, 8/6, 8/21, 9/9, 9/24,

第2章 基盤機関の成立史

10/8, 10/21, 11/5 (拡大新計画準備委員会), 12/3, 12/10, 12/13, 1987年になり 1/8, 2/3, 3/4, 3/14 と頻りに開催された。筆者はヘリカル磁場の最適化のためのモジュラーコイルについて調査・検討し、日本では未だ最適化の手法がマスターされていないことと、最適化ステラレータではダイバータが困難であることを報告した。設計グループのサブグループとして、理論、ダイバータ、実験計画、加熱、計測、本体が組織され、総勢 85 名であった。設計グループの会合を開いている間に京都で IAEA 国際会議、引き続き国際ステラレータワークショップが開催され、関係者は外国の研究者と将来計画について議論するいい機会を得た。

1986年12月12日の昭和61年度第4回会合において、「核融合研究のための国立大学共同利用機関の組織及び構成について(案)」が出され、組織については、国立大学共同利用機関としての一般的組織に従うが、研究・教育における大学等との協力の緊密化、他省庁の研究機関及び産業界との協力、並びに国際協力を推進できる組織にする。予算は1/2原則とする。ことが述べられている。予算の1/2原則のその後の経緯はよく分からない。1987年3月9日の第5回会合において、設計グループから「次期大型ヘリカル装置計画の基本構想の概要(案)」が出される。この後、評価グループで検討された問題点は設計グループに提示され、設計グループはそれら問題点に対する回答を評価部会に提出するという方法を採用ことになる。組織検討部会では、核融合研究所(仮称)は大学共同利用機関とし、名古屋大学プラズマ研究所、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター、広島大学核融合理論研究センターの改組拡充により設置されることが検討された。設計グループ(設計部会)の検討と並行して、プラズマ研では、藤原正巳と筆者が中心となって、1986年度～1987年度の2年間でCHS(次ページの写真)の設計と製作を行った。CHS実験は1988年6月から始まった。設計部会・副査の藤原は、CHS完成後は実験に参加出来なかったが、折にふれ実験を多方面からサポートした。この計画は、ヘリカル型の世界最小の低アスペクト比(太いプラズマ)化を狙ったものであった。が、ヘリカル型では世界最大のATFが完成間

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

近であることと、最適化された W7-AS も完成が近いこともあって、今更何をやろうとするのかとの批判、宇尾光治から低アスペクト比に対する批判、等があった。ヘリオトロンはアスペクト比を高くして（細いプラズマ）、粒子軌道を良くし、強い磁気シアでプラズマの安定性を確保



することに特徴があったため、宇尾光治からの批判は特に強かった。しかし、次期大型ヘリカル装置側からは、高アスペクト比では装置が大きくなり値段が高くなる等の理由により、低アスペクト比に対する支持があった。後日、大型ヘリカル装置では、トロイダル周期数

CHS (Compact Helical System) : 松岡啓介、岡村昇一、井口春和、居田克巳、藤沢彰英、久保伸ほか。運転期間は 1988 年～2006 年。

（アスペクト比と概略比例）を ATF の 12 と CHS の 8 の中間である 10 に選定することになる。幸い、10 を選定する前に ATF と CHS 双方とも初期実験において、ECH によるプラズマ生成が問題なく出来たため、次期大型ヘリカル装置では安心して 10 を選ぶことが出来た。

話は前後するが、1987 年 5 月 20 日に協力者会議が開かれ、次の 3 つの部会が順次設置された。次期大型ヘリカル装置設計部会（主査：飯吉厚夫、副査：藤原正巳）、次期大型ヘリカル装置計画の基本構想についての評価部会（主査：西川恭治、副査：宮原昭）、核融合研究のための新機関の組織検討部会（主査：三好昭一、副査：宅間宏）。1987 年 6 月 9 日の協力者会議において、設計部会から 10 月末を目処に基本構想を固めると

第2章 基盤機関の成立史

の意思表示、評価部会からプラズマパラメータの精度（異常輸送の評価はこれでよいのか）、ヘリオトロン磁場配位の中での最適化（トロイダル周期数、非軸対称配位の多様性を考慮せよ）、加熱・計測系の検討は不十分、等のコメントが出された。土岐市の土地 47 ヘクタール購入は7月に終了したこと、1988年度の概算要求（専任スタッフ、設計費、超伝導開発、準備室設置）について説明があった。加熱・計測が不十分であることについてはプラズマ研の第二次計画からの状況を引きずっていることになる。マンパワー不足は別にしても、加熱によってどのようなパラメータのプラズマを生成し、そこで想起される閉じ込めの問題を解決するためにどのような計測を行わなければいけないか、は計画の根幹であるので、加熱・計測にもっと注意を払うべきであったと関係者の一人として感じている。脇道にそれるが、これまでの歴史を振り返ると、日本の実験装置は工学的には立派に出来上がる（納入時に仕様の性能がきちんと出る、納期に遅れない）。が、装置ができることは必要条件に過ぎず、主目的は実験を行い物理現象を解明することであるという点が若干不十分だったのではなかったか。教訓として、1960年代後半に行われた閉じ込め研究立ち上げ時の議論のように関係者が一丸となって計画全体について議論し満足すべき解を見いだすことが必要であろう。

1987年11月30日の協力者会議では、「次期大型ヘリカル装置設計部会中間報告」についての説明と超伝導コイルか常伝導コイルかについて意見交換が行われた。超伝導の理由については、当然のことながら定常プラズマ実験を行うためであるが、リニアスケールで ATF プラズマの約2倍のプラズマであったため、計画の特長（迫力）を超伝導に持たせる必要もあったと筆者は考えている。実際、超伝導ヘリカルコイルは磁場強度3テスラの時、蓄積エネルギーが約1ギガジュールという前代未聞の規模であり、工学的には非常にチャレンジングであった。電源は残念ながら銅コイルを用いた他の実験装置には使えなかった。この議論の背景には設計部会での議論があり、要は、超伝導ヘリオトロン配位で行くのか、ドイツの最適化設計（W7-AS, W7-X）を踏まえてもっと磁場配位の

探求が必要と考え、将来にその余地を残しておくのか、であったと考えている。しかしながら、既に述べたように、当時はドイツで行われていたヘリカル磁場最適化を日本が独自に行える状況ではなく、それが出来るまで待っていては大型計画が立ち上がらなかったことは事実である。設計部会で、何人かは超伝導に躊躇したが、多数決で超伝導ヘリオトロンに決定した。躊躇した理由としては、電源の融通性の立場（1名）から、未だ磁場配位の探求が必要との立場（筆者を含め2名）からであった。早川主査の「多少の反対があるのは健全なことである」との言葉が印象に残っている。

磁場配位の探求の必要性を感じていた筆者ほかはCHSの後継装置として1993年頃から最適化の一種と目された準軸対称ヘリカル装置CHS-qaの検討を始めた。藤原正巳は次期大型ヘリカル装置の中心メンバーという立場であったものの、この最適化路線を支持した。残念ながら、諸般の理由により建設には至らなかった。京都大学に残った研究者は、ヘリオトロンEを最適化路線の一環としてのヘリオトロンJ（2000年）に改造した（ヘリオトロンJの名前が残っているが、ヘリオトロン配位とは別物である）。ATF以降、外国では最適化ヘリカル装置の流れになり、 Wisconsin 大学でHSXが造られた。PPPLのNCSX（National Compact Stellarator Experiment）はCHS-qaと殆ど同時期に検討が始まったが、残念ながら計画の遅れと予算の拡張により2008年に（一旦）中止となった。超伝導の大型装置W7-Xも完成が大幅に（約10年）遅れている。最適化の代償としてのモジュラーコイルの製作が難しいようであるが、日本で造っていたらうまく出来たかもしれない。

1988年2月9日の第5回協力者会議では、核融合研究所（仮称）創設準備室を名古屋大学に設置することが決まった。組織部会は、広島大学核融合理論研究センターを新研究所に併合した。評価部会は、設計部会に対して指摘した事項はまだ検討を要する。即ち、計測・加熱については羅列的でヘリカルプラズマに関する研究課題の抽出とそれに対する具体的対処に欠けるとのことであった。大学関係の研究者を総動員してい

第2章 基盤機関の成立史

たので、人手不足は理由にならないかもしれないが、ヘリカルプラズマにおいてどのようなプラズマを生成し、何をどのように測定してどのような物理を解明しなければならないかを、計測・加熱の専門家に投げかけるのは酷な気がするが、早川主査からは厳しい指摘があった。

1988年3月17日に開かれた最後の協力者会議では、「核融合研究を推進するための調査研究協力者会議における検討の結果について（報告）」が、別添資料として次期大型ヘリカル装置設計部会報告＋核融合研究のための新機関の組織検討部会報告「核融合研究所（仮称）の組織について」を含めて承認された。コイルは超伝導にすることを決定した。

1988年4月に核融合研究所（仮称）創設準備室が名古屋大学に設置された。教授4（室長：飯吉厚夫、藤原正巳、本島修、黒田勉）、助教授4（北川史郎、等々力二郎、山崎耕造、武藤敬）、助手1（竹入康彦）、客員教授1（佐藤哲也）、客員助教授1、事務官4（大島貞男、河西志郎、桜井雅憲、中島勉）。1989年3月に「大型ヘリカル装置の基本設計」が出され、先に述べたようにトロイダル周期数を10に決定した。また、1989年度の概算要求を作成した。名称は「核融合科学研究所」。1989年2月に出された「核融合科学研究所（仮称）設置構想について（まとめ）」において、これまでの議論の総まとめが行われた。他の大学共同利用機関と同じく、評議員（外国人含む）、運営協議員についても決まった。2名の外国人評議員として、GAの大河千弘とMPIのG.Grieger（世界のヘリカルプラズマ分野の重鎮）が選ばれた。

1989年3月に核融合科学研究所（仮称）設置準備協力者会議が設置され、座長に早川幸男・名大学長、飯吉室長、石原・学術審議会特定研究領域推進分科会会長を含めメンバーは調査協力者会議メンバーとほぼ同じであるが、分子科学研究所から井口洋夫、高エネルギー物理学研究所から菊池健の両氏がメンバーとなった。人事を行い、所長候補者に飯吉室長を推薦した。定員162名、平成元年度予算約40億円を決定した。

1989年5月29日に核融合科学研究所が創設された。その後、1992年度より総研大・数物科学研究科に参加した。

研究所が設立された後すぐに、大型ヘリカル装置に対する質問が日本物理学会誌 Vol. 44(1989年) No. 11 に掲載された。宮本健郎（東大理）から会員の声欄に「大型ヘリカル装置計画(LHS)に対する三つの疑問」として、1) この規模を必要とする理由は？ PLT 並みのプラズマパラメータで閉じ込めの基礎実験を行うことになろう。2) プラズマ・ディスラプションの対策は？不純物制御などによる定常運転の見通しは？ 3) 磁気エネルギー2GJ 超伝導コイルの必然性は？装置規模と中身（プラズマ性能）の不釣り合いに危惧の念を抱く。

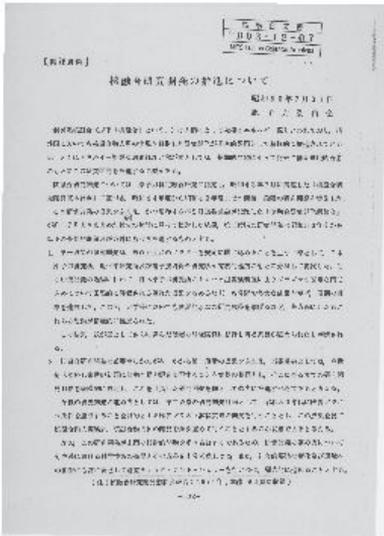
これに対し、飯吉厚夫・核融合科学研究所長から、「宮本健郎氏のコメントに答えて」として、1) 既存のヘリカル装置と3大トカマクの間。周辺制御による閉じ込め時間の改善のためにダイバータがあり、それが有効に働くためには小半径50cmのプラズマが必要になってくる。2) プラズマの β が上昇した時に巨視的不安定性が問題となるが、それらが調べられる。不純物制御はダイバータによって行う。3) 専門家を交えた検討の結果、製作可能と判断。従来の装置では不可能な本格的定常プラズマ実験が可能となる。プラズマ物理をより重視し小型装置でプラズマの振る舞いの理解を深め、将来の糸口を模索しようとする立場と、開発研究の長期計画の段階を設定し、それに必要な大きさの規模の装置を建設し、新しいプラズマ領域での実験的試みによりその性能向上を図る立場がある。我々は後者の立場を採る。との回答が寄せられた。

3大トカマクから ITER へ

話は前後するが、原子力委員会は1975年7月に「第2段階核融合研究開発基本計画」（歴史的資料10、ID番号：003-12-07、次ページ）を發表し、JT-60を日本原子力研究所に建設することを決定した。JT-60は臨界プラズマ条件を目標とし、パラメータの目標値を、プラズマ温度数千万度から1億度、閉じ込め時間と密度の積 $2\sim 6\times 10^{13}\text{sec}\cdot\text{cm}^{-3}$ とした。また、炉心工学研究も行うこととした。1982年にASDEXで発見されたHモードなどの改善モードが次々と見つかり、トカマクは順調に発展した。

第2章 基盤機関の成立史

3大トカマク TFTR (PPPL, 1982), JET (Culham, 1983), JT-60 (JAERI, 1985)が建設され、TFTR, JT-60, JET のプラズマ体積は各々40m³, 60m³, 100m³と大きくなった。また、加熱パワーも数10MWのレベルに達し、



その結果、エネルギー閉じ込め時間、イオン温度、プラズマ密度の核融合3重積は、臨界条件を満足するまでに至った。3大トカマクの実験において、TFTRは1994年にDTプラズマの核融合出力11MWを、JETは1997年に16MWの核融合出力を記録した。また、JT-60Uは1998年に $Q_{eq}=1.25$ を達成し所期の目標を達成した。3大トカマク以外のALCATOR C-mod (MIT, 1992), PBX (PPPL, 1986), DIII-D (GA, 1986), TORE-Supra (Cadarache, 1988)

などもトカマクの改良を目指して、特徴ある実験を行っている。特に、DIII-Dは物理的に有用なデータを生産し続けている。TORE-Supraは超伝導トロイダル磁場コイルの装置で、2003年に1GJの加熱入力を達成した。関連して、LHDではinput energy 1.6GJを1時間放電により2005年に達成した。また、 β 値、密度、イオン温度、電子温度などのパラメータも毎年上昇している。1986年11月にレーガン・ゴルバチョフ会談が行われ、ITER建設を国際協力により推進することが合意された。1992年6月に原子力委員会は、「第3段階核融合研究開発基本計画」を策定し、DT核融合反応により燃焼するプラズマを制御する技術の確立、核融合発電を行う原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の確立を目指した。1996年12月に原子力委員会は「ITER計画懇談会」を設置した。座長は吉川弘之、宮島龍興、井上信幸、飯吉厚夫、井村裕夫、豊田章一郎、藤原正巳ほかがメンバーである。2005年6月にITERのサイトがカダラッシ

ユに決定され、日本人の池田要が機構長に就任した。2002年のノーベル物理学賞を受賞された小柴昌俊氏は、材料や放射性廃棄物の観点から現在の核融合路線に疑問や反対を表明しており、2003年にITER誘致反対の嘆願書を政府に提出した。小柴氏は核融合に反対ではなく、中性子の出ない核融合の実現を渴望しておられるので、核融合コミュニティとしては中性子フルエンスや残留放射能の数値を用いて説明するだけではなく、もっと広い立場に立った見解を述べる必要があるであろう。

まとめ

大学における環状磁場閉じ込めと核融合科学研究所の成立に関して私見をはさみながら歴史を述べた。核融合の実現はなかなか困難で、ITERですら「実験」炉という位置づけである。炉型はトカマクに決まっている訳ではなく、代替路線の研究も行われている。このため、コミュニティ全体は核融合の実現という共通の目標に向かっているが、その方式に違いがある。これまで述べたことは、煎じ詰めれば方式の違いに起因しているところが大きい。それを踏まえ、核融合研究の更なる発展のために、歴史を基に議論すべきこととして、筆者は少なくとも以下のことが重要であると考えている。

エネルギー開発という目的を持った学術研究における大学・大学共同利用機関の役割と原子力機構（旧原子力研究所）との役割の棲み分けはどのようにあるべきであったか。その大前提を踏まえ、実験装置を製作する時には、何を達成するのか或いはどのような物理を解明するのか、そのために何をどのように準備しなければならないかを予め周到に検討し、全て満足すべき状態にすることが大事である。

独創性と物まねに対する考え方はどのようにあるべきか。アイデアや独創性が基礎科学では重要であることは論を待たない。が、開発目的を持った基礎科学である核融合の場合は、話は簡単ではないと考えられる。世界中で建設されたトカマクは、ソ連の物まねになってしまう。が、トカマクやその他有望な装置を国際協力によって色々な切り口から研究し、

第2章 基盤機関の成立史

その中で独創性を発揮することは可能であるし意義がある。

核融合科学研究所の成立に関しては、学審の部会を中心とした議論は在る程度コミュニティに開かれたものであったと考えられるが、プラズマ・核融合学会のメンバー全員に開かれたものではなかった。1960年代の終り頃に日本の将来計画が、プラズマ若手夏の学校において議論されたこと等を鑑みると、時が経つにつれてトップダウン的になってきた印象を持っている。多少時間がかかってもなるべく門戸を拓げた議論が必要であると考え。何事も徹底した議論によってのみ解決されると考えるからである。

謝辞

核融合アーカイブ室の室員（難波忠清、木村一枝、花岡幸子）の各氏には、資料収集・整理に関してお世話になりました。特に、木村一枝氏作成の年表は大いに参考になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- ・畑中武夫，早川幸男他：“大宇宙の原子核反応を語る”科学朝日（朝日新聞社），（1955年4月）pp.41-51.
- ・大河千弘，吉川允二他：“制御核融合の可能性 ジュネーブ原子力会議報告”科学朝日（朝日新聞社），（1958年10月）pp.25-55.
- ・“核融合研究 ヘリコン計画（京大 核融合研究グループ）”科学朝日（朝日新聞社），（1960年2月）p.11
- ・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 Vol.4, No.4(1962) pp.263-268)
- ・核融合懇談会20周年記念特集号(1);核融合研究 43 別冊その5(1980)
- ・核融合懇談会20周年記念特集号(2);核融合研究 43 別冊その6(1980)
- ・松岡啓介：“モジュラーコイルを用いたプラズマの閉じ込め”日本物理学会誌 Vol.41(1986), No.8
- ・“特集 核融合研究の到達点”; 科学(1987年10月) 岩波書店.

核融合科学研究所の設立に至る歴史（松岡）

- ・早川幸男，木村一枝：サロン “核融合研究事始め（1）” 核融合研究 57(4)，201-214（1987）
- ・早川幸男，木村一枝：サロン “核融合研究事始め（2）” 核融合研究 57(5)，271-279（1987）
- ・早川幸男，木村一枝：サロン “核融合研究事始め（3）” 核融合研究 57(6)，364-378（1987）
- ・宮本健郎：“大型ヘリカル装置計画(LHS)に対する三つの疑問”、飯吉厚夫：“宮本健郎氏のコメントに答えて” 日本物理学会誌 Vol. 44(1989) No. 11
- ・R. Herman：*Fusion: The Search for Endless Energy*（Cambridge University Press, 1990）【邦訳】見角鋭二：核融合の政治史（朝日新聞社, 1996年4月）
- ・西尾成子：核融合研究の歴史 委託調査報告書（1995年2月）（ID:075-01）
- ・西尾成子：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（1996年2月）（ID:075-02）
- ・西尾成子：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2月）（ID:075-03）
- ・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）
- ・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）
- ・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－多極分散化から一本化へ” 原子核研究 45(4)，71-151（2000）
- ・西尾成子他：「日本の核融合研究開発の経緯 1965～1986 関口忠氏インタビュー記録」，NIFS-MEMO-33（2001年12月）
- ・西尾成子他：「1980年代後半以降の日本の核融合研究開発の経緯 関口忠氏インタビュー記録」，NIFS-MEMO-40（2003年3月）

第2章 基盤機関の成立史

- ・「核融合 未来へのシナリオ」総研大ジャーナル No.6 (2004 年秋)
- ・山中千代衛：慣性核融合研究開発史ーレーザー核融合パイオニア物語ー (レーザー核融合技術振興会 IFE フォーラム, 2006 年)
- ・寺嶋由之介他：「核反応研究計画「R 計画」の経緯ー松浦清剛先生との懇談の記録を中心にー」 NIFS-MEMO-47 (2006 年 1 月)
- ・宅間宏：「核融合科学研究所成立の歴史」共同利用機関の歴史とアーカイブズ 2005 (2006 年 4 月 24, 25 日、総研大葉山キャンパス)
- ・プラズマ・核融合学会誌 特集号「我が国における核融合の歴史と将来展望」 vol.84 (2008)
- ・プラズマ研究所一〇年の歩み (1972 年)
- ・プラズマ研究所二五年史 (1986 年 12 月)
- ・核融合科学研究所一五年史 (2006 年 3 月)
- ・原研十年史編集委員会：原研十年史 (1966 年 6 月)
- ・原研二十年史編集委員会：原研二十年史 (1976 年 6 月)
- ・原研三十年史編集委員会：原研三十年史 (1986 年 6 月)
- ・原研四十年史編集委員会：原研四十年史 (1996 年 6 月)
- ・日本原子力研究所：原研 30 年のあゆみ (1986 年 6 月)
- ・日本原子力研究所：原研 35 年のあゆみ (1991 年 6 月)
- ・日本原子力研究所史原研史編纂委員会：日本原子力研究所史 (2005 年 3 月)
- ・クルチャトフ研究所：Global Energy (ロシア語 CD) 日本語訳は日本原子力研究開発機構による
- ・飯吉厚夫、武藤 敬、横山雅之：「核融合研究 50 年の進展を振り返って」、プラズマ・核融合学会誌 Vol.85 (2009), pp. 487-598.