



核融合研究50年の進展を振り返って

飯吉厚夫, 武藤 敬¹⁾, 横山雅之¹⁾

中部大学, ¹⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2009年6月15日)

人類の究極のエネルギー源として期待されている制御熱核融合の研究は、1958年に公開研究となってから2008年で50年が経過した。当初はすぐにも実現すると思われたが、すぐに多くの困難に出会うことになった。多くの研究者の努力により、この難関を乗り越えて制御熱核融合の原理実証に成功したが、これからは商用炉に向けていくつもの高いハードルを越えなければならない。50年を経過した機会に核融合研究の過去を振り返ってまとめておくことは、これからの進展を見通し、適切な計画を進めるために役立つと思われる。

1958年当時、筆者 (A.I.) は大学生であった。その頃の学生は、プラズマに関する数少ない教科書、Cowling の "Magnetohydrodynamics" や、Lyman Spitzer の "Physics of Fully Ionized Gases" を一生懸命に勉強していたことが想起される。核融合研究の50年は、まさに筆者 (A.I.) 自身の核融合研究と重なるものであり、こうして振り返ることは感慨無量である。

1. 多様なアイデアの競争

制御熱核融合の研究は、1950年頃、米、旧ソ連、英において当初は秘密裡に行われていたが、1955年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において、議長 の H.J. Bhabha (図1) が、20年後には核融合によって制御された形でエネルギーを取り出すことができるだろうと予言した。

これが契機となり、1958年に再びジュネーブで開催された第2回原子力平和利用会議では、秘密研究が解除となり、米、英、旧ソ連を中心に、それまでの核融合研究が一斉に公開された。図2に示すように、その会議で報告された実験装置としては、Harwell 研究所 (英国) のトロイダルピンチ ZETA、プリンストンプラズマ物理研究所 (米国) の Model-B3 ステラレータ、オークリッジ国立研究所 (米国) の DCX、クルチャトフ研究所 (旧ソ連) の OGRA、リバモア研究所 (米国) の ASTRON などの直線ピンチがあり、いずれも、すぐにも制御熱核融合が実現できる、と考えられていた。現在も研究が進められている概念であるが、すでに50年前に黎明期の研究が行われていたことは感慨深いものがある。しかし、このように意欲に燃えた研究は、1961年にザルツブルグで開催された第1回 IAEA プラズマ・核融合会議の頃には、すでに多くの困難に直面していた。このことは、L.A. Artsimovich の有名な「煉獄の苦しみ」発言に表れている [1]。

本稿では、多様な核融合研究のアイデアの中から、現在まで進化を続けている方式を中心に、述べてみたい。

2008年9月にプラズマ物理国際会議 ICPP2008 (International Congress of Plasma Physics 2008) が開催され、特別講演「核融合研究の50年」が筆者 (A.I.) により行われた。本稿はその講演原稿をもとにまとめたものである。参考文献は代表的なもののみ記載にとどめた。

本文中にある出典「C.M. Braams & P.E. Stott」は Nuclear Fusion - Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research - C.M. Braams and P.E. Stott, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia (2002) を指す。

まず、直線ピンチ概念から派生したミラー閉じ込め概念について述べる。このような直線閉じ込めにとって端損失は克服すべき課題である。単純ミラー磁場やカスプ磁場を用いて端損失を抑える (plugging) アイデアが試されたが、異常輸送による閉じ込め劣化のためにうまくいかなかった。この異常輸送の原因は、後に、フルート不安定性によるものであることが確認され、その安定化を図るために、極小磁場 (minimum-B) 概念の適用が図られた。ヨッフエバー、ベースボールコイル、インヤンコイルを用いた極小磁場配位が提案された。これら概念の模式図を図3に示す。極小磁場概念による巨視的安定化の実証は、「煉獄の



図1 H.J. Bhabha 議長 (右から2番目) [第1回原子力平和利用国際会議 (Geneva, 1955)] (出典: 核融合科学研究所核融合アーカイブ室 <http://www.nifs.ac.jp/archives/2007final.pdf>).

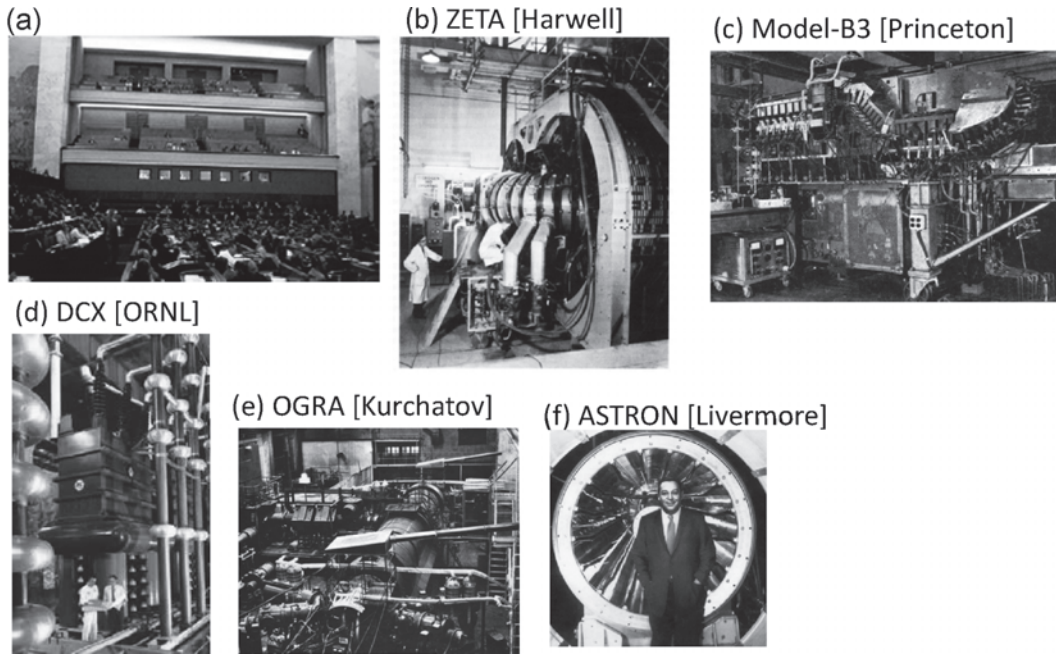


図2 (a)第2回原子力平和利用会議 (Geneva,1958)の会場の様子 (出典:核融合科学研究所核融合アーカイブ室)と、その会議で研究報告がなされた世界各地の主要な実験装置の写真。(b)トロイダルピンチ装置 ZETA[Harwell] (出典:C.M.Braams & P.E.Stott), (c)ステラレータ装置 Model-B3[Princeton] (出典:Reproduced from presentation file by Prof. F.Waelbroeck at 25th JET Anniversary, Culham (2004)), (d)ミラー装置 DCX[ORNL] (出典:ORNL review 25(2002)), (e)ミラー装置 OGRA[Kurchatov] (出典:Reproduced from presentation file by Prof. F.Waelbroeck at 25th JET Anniversary, Culham (2004)), (f)ミラー装置 ASTRON[Livermore] (出典:LLNL Archives).

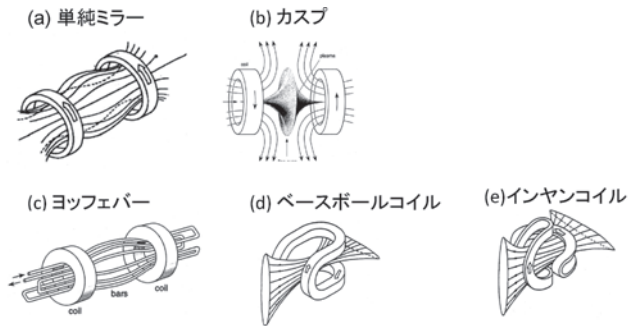


図3 ミラー閉じ込めにおける端損失の克服をめざした種々の磁場概念。(a)単純ミラー (出典:近藤育朗, 栗原研一, 宮健三著「核融合エネルギーのはなし」日刊工業新聞社, 1999), (b)カスプ, 極小磁場配位形成のための(c)ヨッフエバー, (d)ベースボールコイル, (e)インヤンコイル。(b)~(e)の出典:C.M. Braams & P.E. Stott).

苦しみ」発言に象徴される, ザルツブルグ会議での落ち込んだムードを吹き飛ばす, 大きなブレイクスルーであった。リバモア研究所の 2XII B 装置では, インヤンコイルが端部プラグに採用された。その結果, フルト不安定性の抑制に成功し, 1975年には, 40%にも至る高ベータプラズマの安定閉じ込めが実証された[2]。

端損失のさらなる克服をめざして, タンデムミラー概念が提案された。1978年, 筑波大学の GAMMA-6 は, 世界で初めて, 端部での両極性ポテンシャル障壁形成に成功した。このような成功を受けての第2世代のミラー装置では, 端部でのポテンシャル障壁形成と軸対称磁場との整合性を図る研究が展開された。

図4は, リバモア研究所で建設が進められていたタンデ



図4 MFTF-B 装置[Livermore]のインヤンコイルの搬入風景。6 m もの高さを有している。(出典: https://www.llnl.gov/str/January01/pdfs/01_01.3.pdf)

ムミラー装置 MFTF-B に用いられるべく完成した, 6 m もの高さを有するインヤンコイルの写真である。しかしながら, MFTF-B は実験を行うことなく, 1986年に計画そのものの中止の決定がなされた。財政上の理由と言われているが, 当時, トカマク方式での研究が世界各地で進展を見せ始めていたことも中止の背景として無視できないであろう。この決定によって, 世界のミラー閉じ込め研究は, 大幅に減速してしまう結果になった。今日では, 筑波大学の GAMMA-10 が, 最大の実験装置として, 研究を続けている。

ミラー系核融合装置の利点は端部から出てくる高エネルギー粒子を用いた直接発電が利用しやすいことである。ローソン条件は通常熱効率を 33% で計算するが, もし 90% 以上の高効率が可能であれば, 条件は大幅に緩和される[3]。磁力線に沿って出てくる粒子を利用した直接発電が

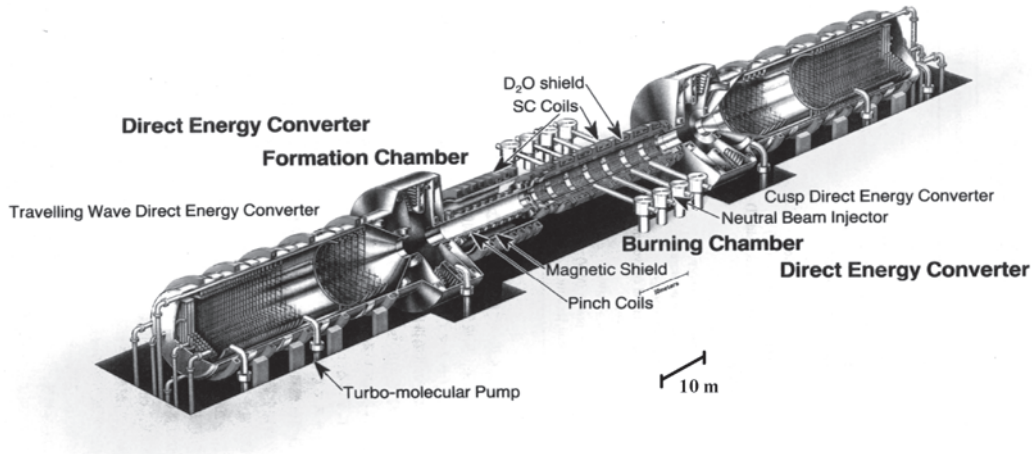


図5 FRC概念に基づくD-³He核融合炉ARTEMISの概念図。FRC生成部(Formation Chamber)、燃焼部(Burning Chamber)、直接エネルギー変換器(Direct Energy Converter)部から構成される。

高効率で実現できれば、ミラーを始めとする直線型の装置は実現性を高く持つことになる。高いベータ値と先進燃料(D-³He)を用いた、直接発電を用いた直線型FRC(Field Reversed Configuration)核融合炉(ARTEMIS)の炉心概念設計が1990年頃に日本で行われた。ARTEMISの概念図を図5に示す。FRC生成部(Formation Chamber)、燃焼部(Burning Chamber)、直接エネルギー変換器(Direct Energy Converter)部から構成され、全長は約160mである。ミラー型と似た形状であるが、FRC炉心と、カスプ磁場による荷電分離と進行波型の直接エネルギー変換器を両側に有しており、それぞれの変換効率が65%、76%と高い値が期待できる[4]。

ここで、レーザー核融合研究について若干触れておきたい。MFTF-Bの計画中止が決定された1980年代中頃、制御熱核融合の実現に向けた新たな手法として、レーザー核融合研究が公開された。日本では、激光シリーズの数々の実験装置を用いた研究が進展し、1991年には、1000 g/ccという超高密度爆縮に成功した。点火条件に向けて超高密度爆縮プラズマをさらに加熱する手法として、高速点火概念が大阪大学より提唱され、2002年にペタワットレーザーによる加熱を実証した。この成果に基づいて、高速点火実証計画(Fast Ignition Realization Experiment)がスタートした。第一段階のFIREX-Iでは、核融合点火温度への加熱の実現、さらには、第二段階であるFIREX-IIでは、核融合点火・燃焼の実現と高エネルギー利得の実現を図る計画である。米国では、リバモアのNOVAにおける高密度爆縮、ロチェスター大学のOMEGAにおける高中性子利得が実現されている。さらに、米国では、国防省の予算によってNIFを建設中、フランスではLMJが建設中であり、それぞれ、自己点火実証をめざすなど、自己点火領域での研究段階へと入りつつある。これら、レーザー核融合研究の進展を、図6に示す。

以下では、限られた紙面の中で、トカマク方式、ヘリカル方式研究の進展を、特筆すべき成果に触れながら振り返りたい。

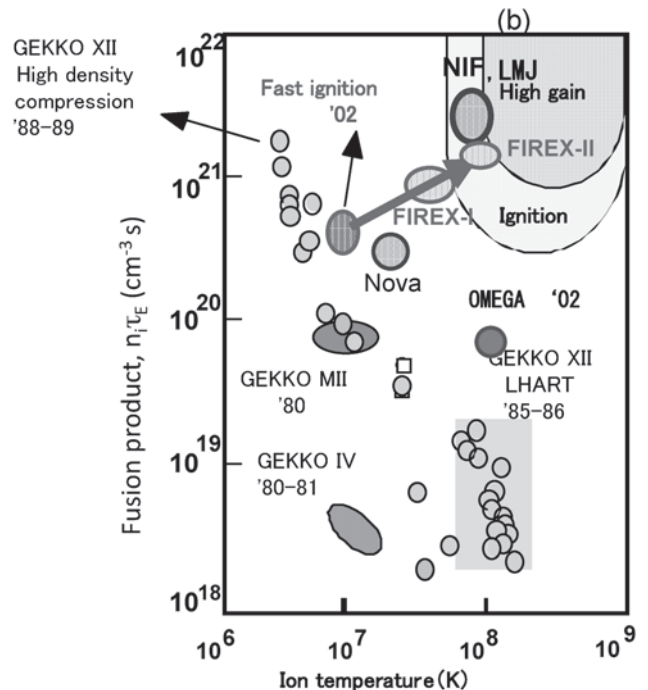


図6 レーザー核融合研究の進展(横軸はイオン温度、縦軸は核融合積[イオン密度とエネルギー閉じ込め時間の積])(大阪大学三間園興名誉教授提供)。

2. トカマクの進展

第2回原子力平和利用会議で報告されたトロイダルピンチZETA(図2(b))は、Zero Energy Thermonuclear Assembly(入力パワー=出力パワー)の名が示すように、制御熱核融合によるエネルギー発生を実証するという野心的な研究計画であった。しかしながら、キンク不安定性による閉じ込め劣化に悩まされ、その実証は叶わなかった。この問題を克服するために、タム、サハロフ両博士(旧ソ連)は、トロイダル磁場を強くしてキンク不安定性を抑える概念を提案し、それによって、Kruskal-Shafranov限界まで閉じ込め性能を向上させることに成功した。トカマク研究の黎明である。

1960年代には、クルチャトフ研究所においてTシリーズのトカマク実験が進められ、世界の核融合研究に大きなイ

ンパクトを与えた。特筆すべきは、1968年に T-3 トカマク (図 7 (a)) で、1 keV の電子温度、ボーム閉じ込めをはるかに超える (約50倍) 良好なエネルギー閉じ込め時間を達成した (図 7 (b)) ことであろう [5]。カラム研究所の研究者がクルチャトフを訪れ、カラムから持ち込んだトムソン散乱計測装置で 1 keV の電子温度を追試、実証したことは有名である [6]。この出来事は、核融合研究における国際協力の端緒とも言える。

T-3 トカマクでは、プラズマ電流は 100 kA オーダであったが、1970-1980年代の PLT, D-III, ASDEX, JFT といったトカマクでは、MA クラスのプラズマ実験が展開された。NBI や RF 技術の進展に伴う加熱パワーの増強によるプラズマ温度の進展 (図 8 (a) : PLT でのイオン温度 5 keV 達成) [7]、高ベータプラズマの実現 (図 8 (b) : DIII-D

での体積平均ベータ約 11%, $\beta_N \sim 3.5\text{-}5$ 達成) [8]、計測技術の進歩、ダイバータ研究の進展などにより、閉じ込めスケール研究も大幅に進展し、後の大型トカマク装置設計にも大いに活用された。

1982年の ASDEX における H モードの発見は、核融合研究に大きな希望とインパクトをもたらした [9]。ダイバータプラズマにおける強力 NBI 加熱 (>2 MW) によって、エネルギー閉じ込め時間が倍増する現象が発見された。(図 9 (a))。周辺部の密度勾配も急峻化 (図 9 (b)) し、周辺部での粒子・熱の損失の突然の減少を理解する観点から、リサイクリング効果に注目が集まった。H モードの発見は、ダイバータ、周辺プラズマに関する精力的研究を促すとともに、分布制御研究の端緒ともなった。また、プラズマ表面付近の電場の分岐性に基づいた新たな理論も提唱

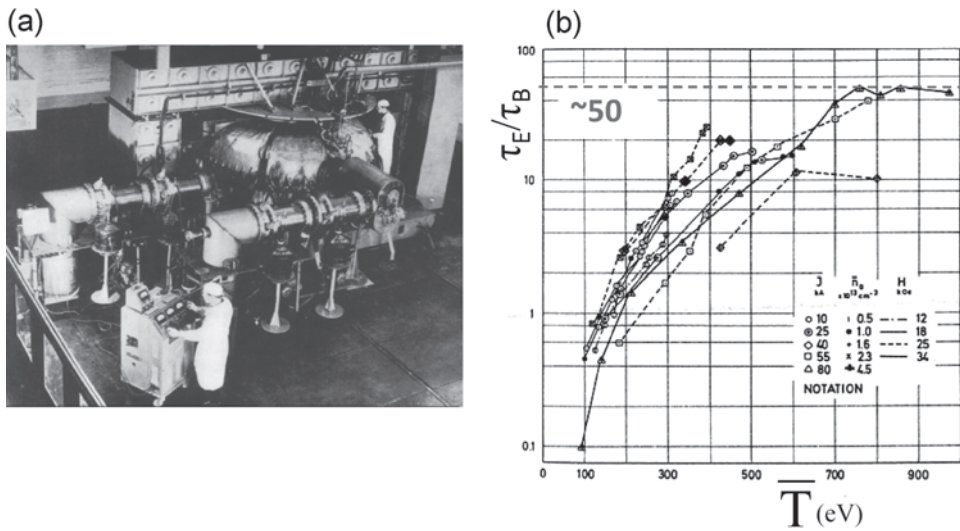


図 7 (a) T-3 装置写真 (Reproduced from presentation file by Prof. F.Waelbroeck at 25th JET Anniversary, Culham (2004)), (b) T-3 における、ボーム閉じ込めをはるかに超える良好なエネルギー閉じ込めの実現を示した図。横軸はプラズマ温度 (eV)、縦軸は、ボーム閉じ込め時間 (τ_B) で規格化したエネルギー閉じ込め時間 (τ_E) を表している [5]。

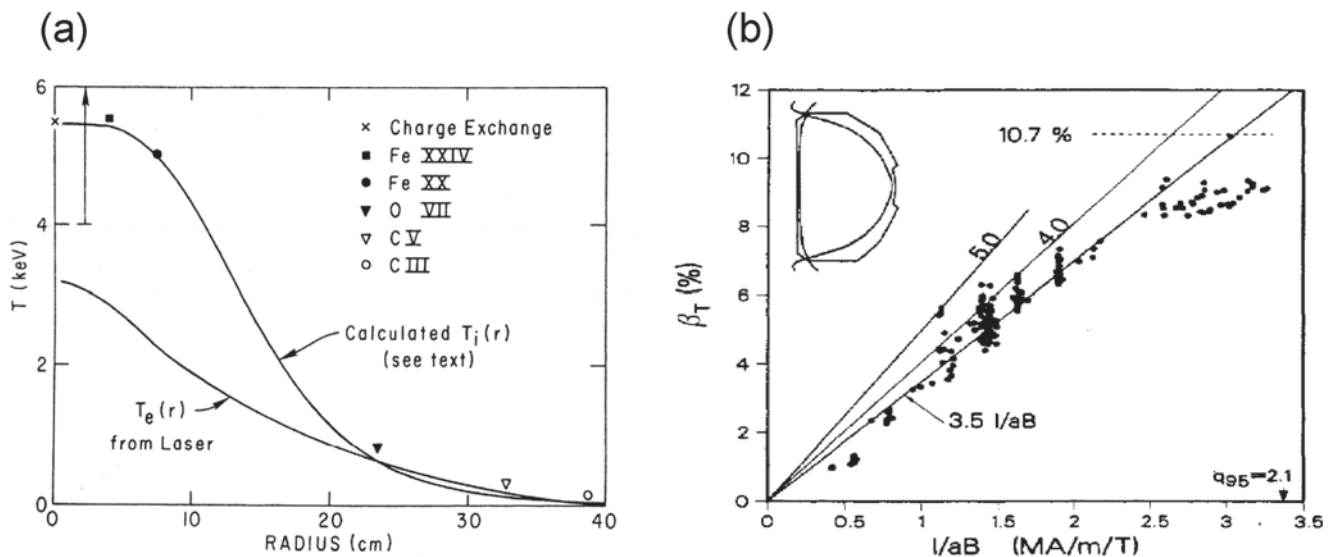


図 8 (a) PLT 装置における 5 keV のイオン温度を達成したプラズマのイオン温度、電子温度分布 [7]。 (b) DIII-D 装置における高ベータ実現 [8]。 β_N は、ベータ値 β_T を、 I/aB [I : プラズマ電流, a : プラズマ小半径, B : 磁場強度] で規格化した際の比例係数を表しており、規格化ベータ、あるいはトロロン係数と呼ばれる。

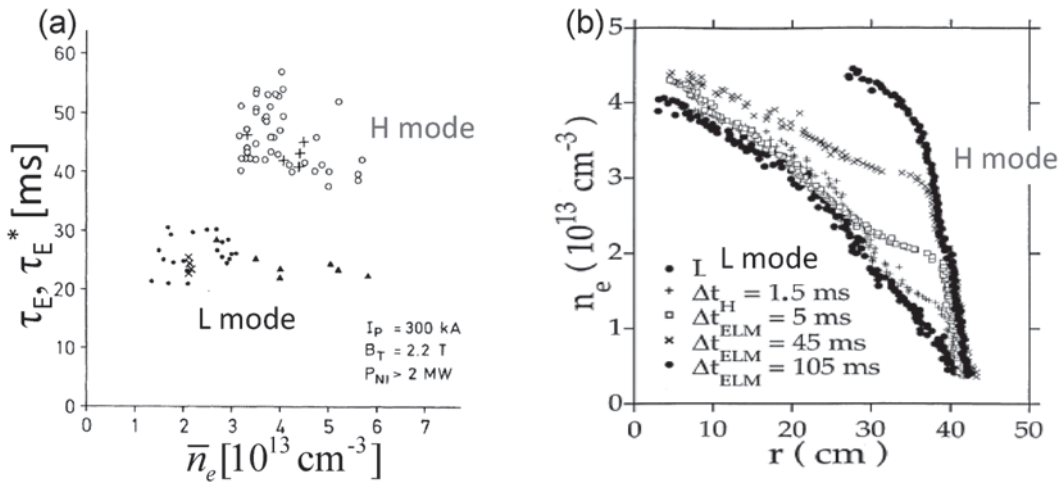


図9 (a)LモードからHモードへのエネルギー閉じ込め時間の改善を示す図。LモードからHモードへの遷移で、エネルギー閉じ込め時間が約2倍に増加している[9]。(b)LモードとHモード時の周辺部密度勾配。Hモードへの遷移で、周辺部の密度勾配の急峻化が起こっている。(M.E. Manso, Plasma Phys. Control. Fusion **35**, B141 (1993).)

され、電場を活用した閉じ込め改善研究の潮流の原点となっている。

JT-60Uにおいても、輸送障壁など特徴的な圧力分布を有する、反転磁気シアモード、高 β_p モードなど種々の改善閉じ込めモード研究が精力的に行われ、閉じ込め性能の大きな進展をもたらされた(図10)。

このような、小型、中型トカマクにおける研究進展に基づいて、数MAクラスのプラズマ実験を行う大型トカマク、JET、TFTR、JT-60が競争的に建設された。これら大型トカマクは、制御熱核融合条件に至るプラズマ研究をめざした設計がなされた。

これら大型トカマクにおける最も特筆すべき出来事は、DT実験による制御熱核融合エネルギーの実証であろう。図11に示すように、1991年のJETでのDT実験を皮切りに、1994年にTFTRで10MW、さらに、1997年にJETで16.1MW ($Q = 0.65$)という核融合エネルギーの実証に成功した[10]。1997年のJETでのDT実験では、エネルギーバランス解析から、核融合生成アルファ粒子によるプラズ

マ加熱も確認された。(図12で $P_{fusion} \sim 70\% P_{heating}$ と書かれたデータでは、アルファ粒子による加熱が加熱パワー全体の70%に達している[10].)

1955年の第1回原子力平和利用会議でBhabha氏が予測した「20年後」と比べると、約2倍の年月を要したが、人類が制御熱核融合エネルギーを手にした大きな成果である。

また、核融合三重積の進展を図12に示す。横軸は中心イオン温度、縦軸は核融合三重積である。T-3での1keV達成から、ここ40年で、三重積はおよそ4桁も向上している。少し大きな丸印で示したJET、TFTRのデータは、DT実験での値、JT-60Uのデータは、DD実験からのDT換算値である。DT換算ではあるが、 $Q_{DT} \sim 1.25$ を達成している。

世界各地の、異なったサイズ、形状、磁場強度などを有する数多くのトカマクにおける実験データに基づいて、スケールング則を導き、種々のパラメータへの依存性を把

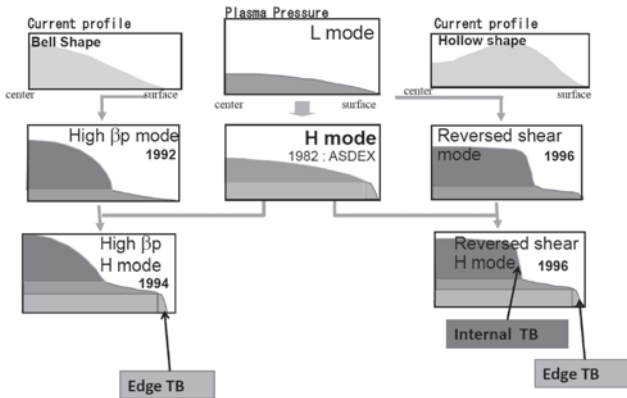


図10 JT-60Uにおける種々の改善閉じ込めモード研究の進展。電流、圧力分布の制御手法の進展により、反転磁気シアモード、高 β_p モード、さらに、周辺部に輸送障壁が形成(Hモード)された複合的改善閉じ込めモードも実現されている。(日本原子力研究開発機構牛草健吉核融合研究開発調整グループリーダー提供)。

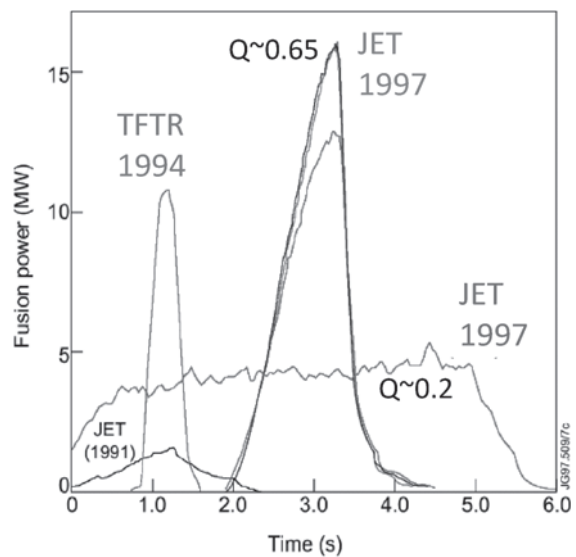


図11 大型トカマクにおけるDT実験の推移。JETにおける1997年の実験では16.1MW ($Q = 0.65$)、定常化を図った条件では、およそ4sにわたって、約4MW ($Q \sim 0.2$)を実現している[10].

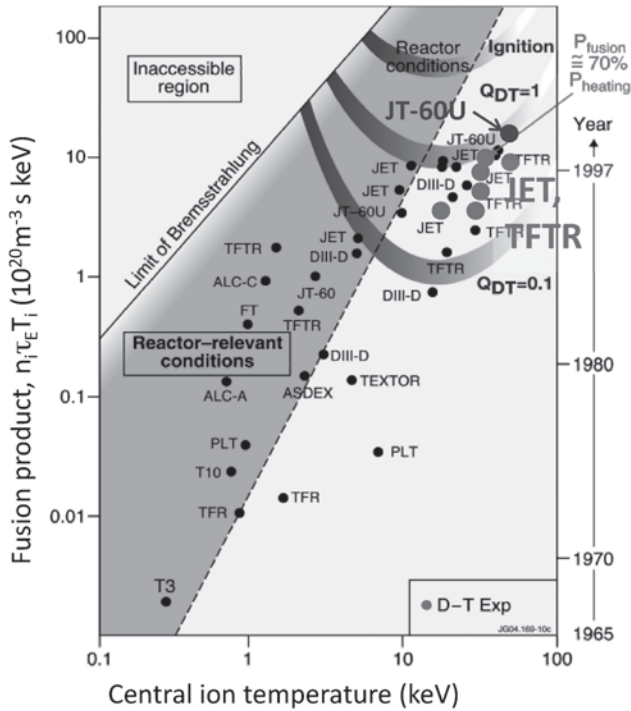


図12 トカマク研究における核融合三重積の進展。横軸は中心部のイオン温度、縦軸は、核融合三重積（イオン密度 $[10^{20} \text{ m}^{-3}]$ 、エネルギー閉じ込め時間 τ [s]、イオン温度 T_i [keV]の積）を表している。
(Reproduced from Prof. P.H. Rebut's presentation at 25th JET Anniversary, Culham (2004))

握、予測性能を高めた装置設計を可能とする研究も、国際協力によって大きな進展を見せている。Hモードへの遷移に必要な加熱パワーの閾値に関するスケールング則、エネルギー閉じ込め時間のスケールング則(図13)などである。様々なトカマクからのデータを集積し、その回帰的解析に基づいて、スケールング則を導き出している。これらのスケールング研究は、ITERにおけるHモードへの遷移に必要な加熱パワー評価、予測されるエネルギー閉じ込め時間の評価など、設計活動に役立てられている。図13に示されているように、ITER (ITER-FEAT) においては、3.7 s 程度のエネルギー閉じ込め時間が予測される。

ITER計画は、1985年の米ソ首脳会談(レーガン・ゴルバチョフ会談)がその発端である。当初EU、日本、旧ソ連、米国の4極(米国は1999年にいったん脱退したが、その後2003年に復帰)によって概念設計・工学設計活動が展開されていたが、現在では、中国、EU、インド、日本、韓国、ロシア、米国(アルファベット順)の7極が参加し、参加極総人口は世界人口の半数以上に及ぶというまさに世界的プロジェクトになっている。コスト超過の懸念から、装置サイズの再評価(ダウンサイズ: ITER-FEAT)が行われ、 $Q = \infty$ の実証という当初目標も、 $Q = 10$ (ただし、 $Q = \infty$ の可能性も含む)となっている。フランス・カダラッシュで装置建設が進められている状況である。

また、高ベータプラズマの物理研究を志向したスフェリカルトカマク(ST)研究も1980年代の概念提唱から、1990年代のSTART(図14(a))での約40%のベータ値実証と良

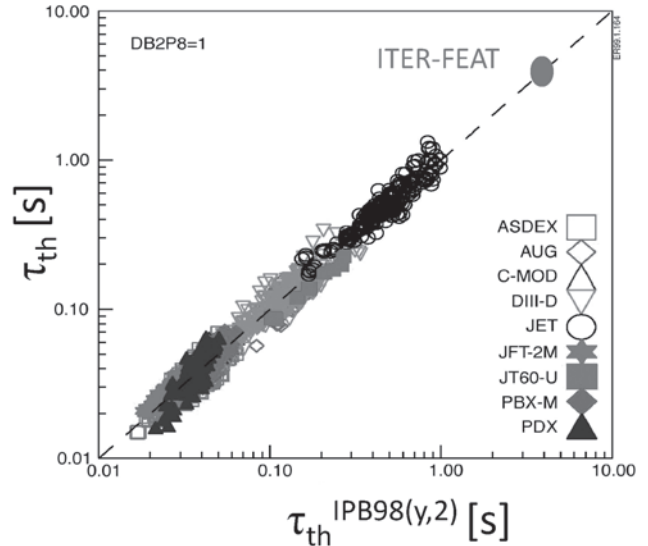


図13 数々のトカマク装置におけるエネルギー閉じ込め時間から導出された、エネルギー閉じ込め時間のスケールング則(図中の直線)と、それに基づくITERでのエネルギー閉じ込め時間の予測値。ここで示されたスケールング則 $\tau_{EIPB98(y,2)} = 0.0562 H_H I_p^{0.93} B_T^{0.15} n_e^{0.41} P^{-0.69} R^{1.97} M^{0.19} \kappa^{0.78} \epsilon^{0.58}$ は、IPB98(y,2)スケールングと呼ばれ、 I_p (プラズマ電流)、 B_T (トロイダル磁場)、 P (加熱パワー)、 M (イオン質量比)、 κ (楕円度)、 ϵ (逆アスペクト比)への依存性が示されている。このスケールングからの改善度が、閉じ込め改善度 H_H として評価されている。ITER-FEATとあるのが、現在のITERの設計点である (<http://www.iter.org>)。

好な閉じ込めの実証がなされて[11]から、MAST(英国)、NSTX(米国)でのMAクラスのプラズマ電流実現、より高温領域での核融合炉設計に必要なデータベースの蓄積などの進展をもって世界各地で展開されている。さらに、九州大学のQUEST装置(図14(b))が、2008年6月にファーストプラズマ点火に成功した。TRIAMでの長時間放電の実績を活用した、STプラズマの長時間閉じ込め、プラズマ-壁相互作用の研究など、ユニークな研究が展開されることが期待される。

トカマク方式研究の進展に関するまとめに代えて、図15に、トカマクの系譜を示す。プラズマサイズ、断面形状の概略が示されている。主な特徴として、“白抜き”はダイバータを備えた装置、“水玉模様”はDT実験(JETとTFTR)、“縦じま”は非円形(strongly shaped)断面、“濃い塗りつぶし”は高磁場強度の装置、“横線”はSTを示している。また、“装置名に下線を付したものは超伝導装置である。EAST(中国)、KSTAR(韓国)の実験開始、SST1(インド)の建設[いずれも超伝導装置]など、アジア地域における研究の興隆も大いに期待される場所である。

旧ソ連で発明されたトカマクが、T-3トカマクの成功以来、核融合研究の主流として発展し、これまで各国で最も多くの人材と予算を投入して研究が進められ、ITER計画につながっている。

3. ヘリカルな進展

L.Spitzerのアイデアであるステラレータは、1958年に

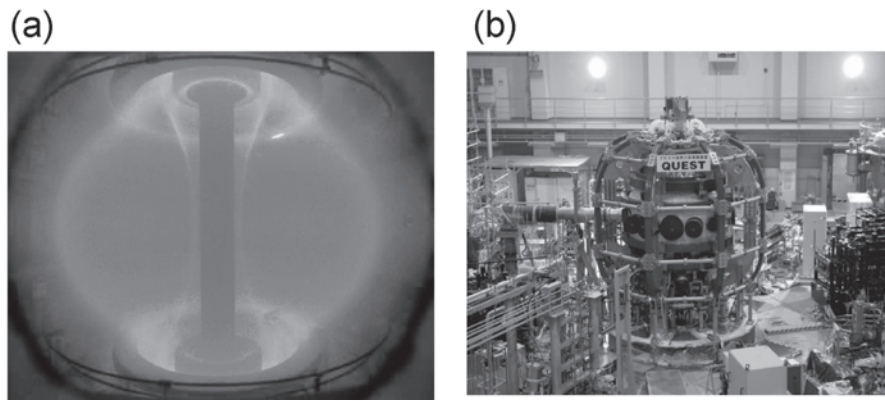


図14 (a)START 装置のプラズマ (出典: <http://www.fusion.org.uk>)。世界で初めての高温 ST プラズマを実現し、40%のベータ値実証も行った。(b)TRIAM-QUEST 装置。2008年 6月にファーストプラズマの点火に成功し、STの長時間閉じ込め等の研究が進められている。(九州大学 佐藤浩之助名誉教授提供)

Model B-3 ステラレータがジュネーブで発表される (図 1 参照) までに、すでにプリンストンでいくつかの実験装置が建設、実験が進められていた。これらの研究進展に基づ

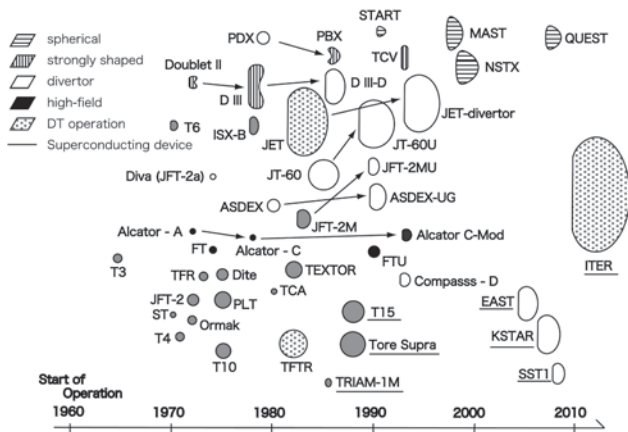


図15 トカマク方式研究の系譜。(出典: K.Lackner 氏の2002年 Snowmass 会議での発表資料に基づいて改訂・追記, [謝辞: K.Lackner 氏, F.Wagner 氏 (Max-Planck Institut für Plasmaphysik, Germany).])

いて、Model C ステラレータが建設され、1961年に実験が開始された。ZETA と同様に、C ステラレータも、制御核融合反応の実証を目的としていた。

C ステラレータの装置写真と概観図を図16に示す。回転変換生成のための $l=2$ と、磁気シア生成のための $l=3$ のヘリカル巻線が、レーストラック型の放電管の U ベント部 2 か所に巻かれていた。それぞれ、平衡、安定性の保持を意図している。磁場強度は 30 kG (3 T), ICRH アンテナ, また、不純物制御のためのダイバータ (世界初) も設置され、動力炉をもめざした当時の研究者の意気込みを感じさせる。

筆者 (A.I.) 自身、1965年からの 2 年間、C ステラレータ実験に参加することができた。ICRF 実験に参加し、イオン温度 3 keV, 10% の重水素・90% の水素から成るプラズマの ICRF 加熱実験で、25 keV の少数イオン加熱にも成功した。

しかしながら、C ステラレータにおけるプラズマ閉じ込めは、図17に示されているように、プラズマ温度の上昇とともに閉じ込め時間が反比例的に減少するボーム拡散に悩

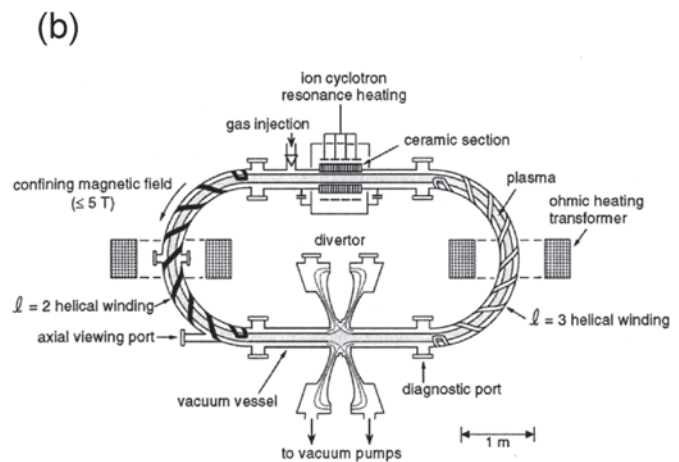
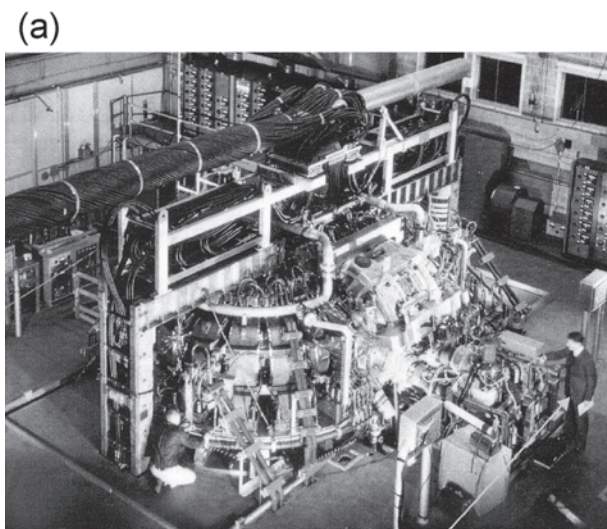


図16 (a)C ステラレータの装置写真 (出典: <http://www.bryndan.com/pppl/pppl-small.pdf>) と (b)装置概観図 (出典: C.M.Braams & P.E.Stott). 装置直線部に ICRH アンテナ, ダイバータが設置されている。

まされた[12]. ボーム拡散のままでは、現実的な装置サイズでの自己点火は不可能であり、研究者たちは落胆した。その原因は長い間不明のままであった。1971年、Hoseaらによって電子ビームを用いた磁気面マッピングが初めて行われるに至って、多くの磁気島の存在によって理想的な入れ子状磁気面が形成されていないことが示された[13]。この磁気面計測結果によって、ボーム拡散が、誤差磁場（給電部の電流フィード、Uベント上のヘリカル巻線と直線部との接続の不完全さ（図16(b)にあるように、ヘリカル巻線が、直線部手前で巻き戻されている）などが原因と考えられる）によるものであるとの理解に至った。

しかし、不幸にも、この磁気面計測が行われた時には、すでに、Cステラレータをトカマク（名称ST）に改造することが決定されていた。筆者（A.I.）は、Cステラレータの実験終了直前に帰国したが、ヘリカル方式核融合研究において、精度の高い入れ子状の磁気面を形成することがきわめて重要であるとの思いを抱いての帰国であった。

ここで、ヘリカル系装置における磁気面マッピングの例を示す。図18 (a) は、Cステラレータ、図18 (b) はLHDにおける結果である。ヘリオトロンE, Wendelstein 7-ASなど、その後のヘリカル系装置においては、精度の高い入れ子状磁気面が形成されている。特に、LHDにおいては、ヘリカルコイル大半径3.9mという大きさに対して、ヘリカル巻線の許容誤差として2mmというきわめて厳しい条件を課し、その実現によって、入れ子状磁気面を確保している。Cステラレータでの教訓が、後のヘリカル方式核融合研究に活用されていることを示している。

図19に、ヘリカル方式核融合研究の発展を、種々の概念、実験装置に触れながら示している。ヘリカル方式核融合研究は、閉じ込め磁場を外部コイルによって形成しているため、定常性の高い概念として、研究の黎明期から認識されていた。

ヘリカル研究は、ステラレータ概念とヘリオトロン概念とに大別できるであろう。

ステラレータ概念の研究動向は、その後の Figure 8 (8

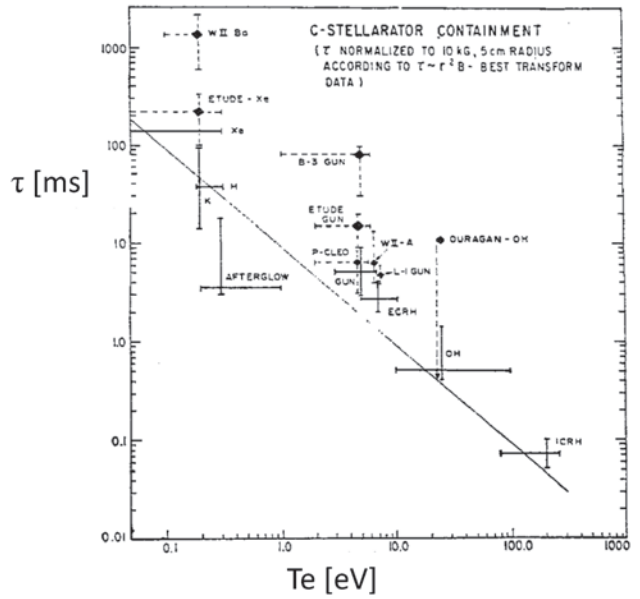


図17 Cステラレータの種々の放電におけるエネルギー閉じ込め時間。閉じ込め時間 τ が、電子温度 T_e に反比例している様子が示されている[12]。

の字型) ステラレータ, ヘリアック (TJ-II [スペイン], H-1 [オーストラリア], 東北大学ヘリアック), ヘリアス (Wendelstein 7-AS [ドイツ]), 準対称 (HSX [米国]: 準ヘリカル対称, NCSX [米国]: 準軸対称, 2008年5月に装置建設途中で計画中止), 準等磁場概念 (Wendelstein 7-X [ドイツ]) など立体磁気軸系の研究に進展してきている。中でも、Wendelstein 7-ASはステラレータ概念のkeVクラスの原理実証装置として多くの成果を挙げた。その発展として、超伝導モジュラーコイルを用いたWendelstein 7-Xが、マックスプランクプラズマ物理研究所で建設中であり、ステラレータの定常性能実証をめざした実験の開始を2014年に予定している。

ヘリオトロン概念は日本独自のアイデアとして、1958年、宇尾光治教授によって京都大学で発案された。1970年ごろから筆者（A.I.）らが参画したヘリオトロンD装置、ま

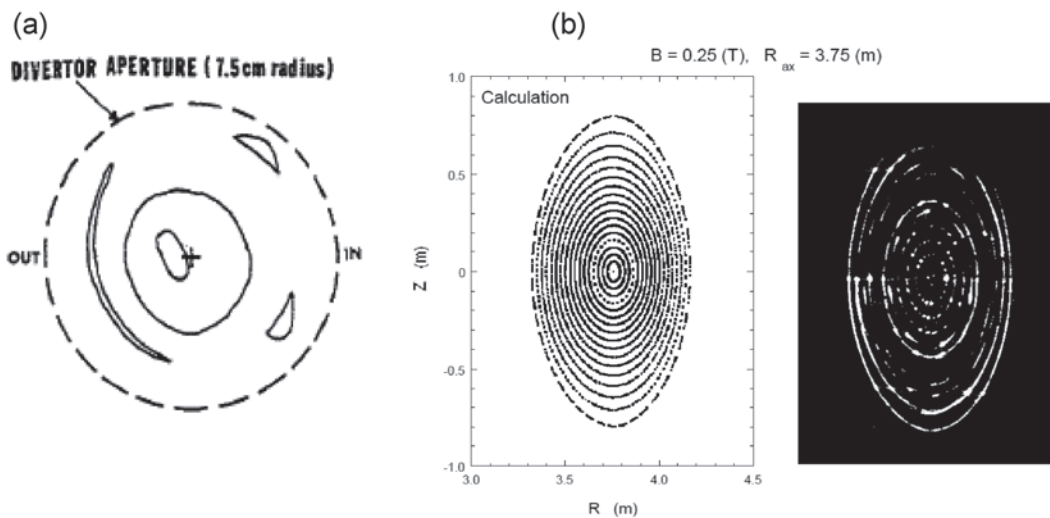


図18 (a)Cステラレータ[13], (b)LHDにおける磁気面マッピングの結果(O. Motojima et al., Nucl. Fusion 40, 599 (2000)). 磁力線追跡計算の結果が(b)の左図に示されている。

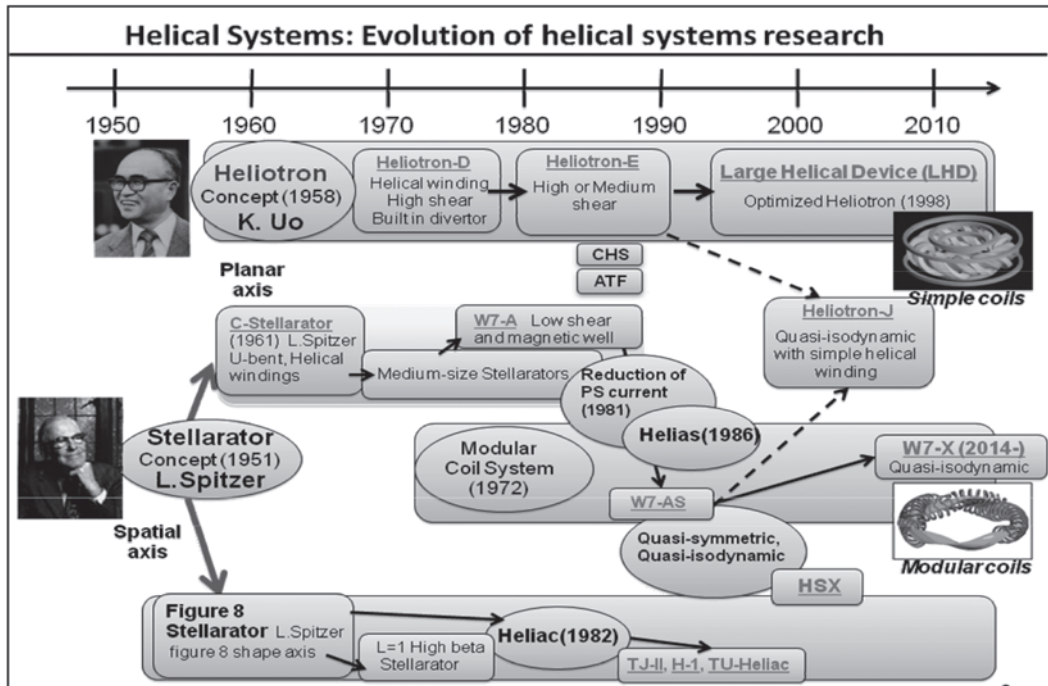


図19 ヘリカル方式核融合研究を構成する、ステラレータ系とヘリオトロン系の発展を示す系統図。宇尾の提案による、巻き戻しのない2條の連続巻線によるヘリオトロン配位は、LHDへと発展し、一方、L.Spitzerの提案によるステラレータ磁場は、ヘリアック系、ヘリアス系など多様な配位へ進展した。

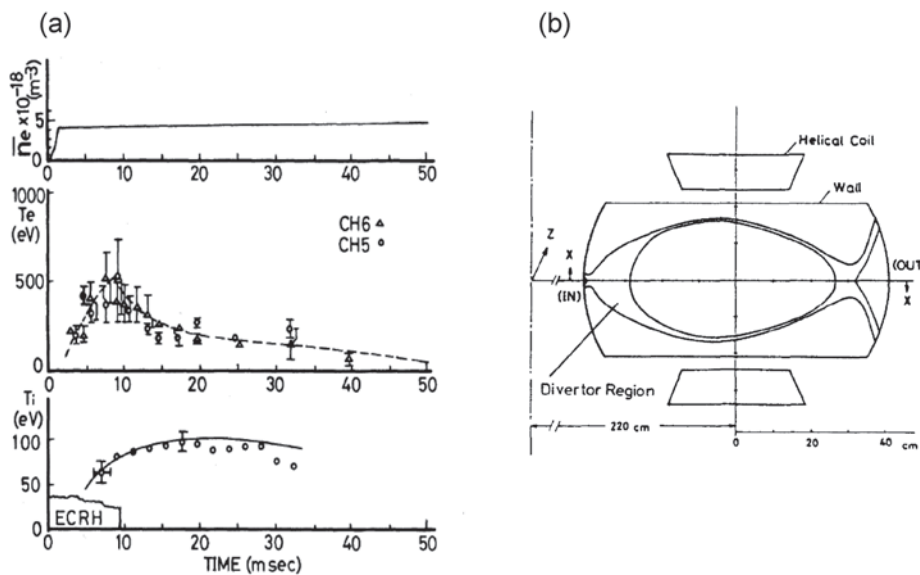


図20 (a)ヘリオトロンE装置において、無電流ECHプラズマの閉じ込め実証[14]、(b)自然に備わった磁力線構造を活用したダイバータ配位[15]によるプラズマ・壁相互作用研究が展開された。オーミック加熱に頼っていたプラズマ実験から、トロイダル電流のない良好なプラズマ閉じ込めへの転換は、その後のヘリオトロン研究に新しい展開を与えた。

た、1980年代の keV クラスの原理実証装置ヘリオトロン E を経て、現在の LHD 研究へと発展してきている。ヘリオトロンにおいては、2重らせん形状のシンプルな連続巻きのヘリカルコイル系を採用しており、ヘリアス配位のようなモジュラーコイルと対照的である。

ヘリオトロン E では、図20(a)に示したように、1982年に keV クラスの無電流 ECH プラズマの生成に成功した [14]。当時のトラス装置ではオーミック加熱が主流で、他の加熱法は補助加熱と呼ばれていたが、加熱電流がない状態での良好な閉じ込めを実証したことが、その後のヘリ

カル方式の進展につながっている。図20(b)は、ヘリオトロン配位で自然に備わっている磁力線構造を活用したダイバータ形状を示している。ダイバータ研究、プラズマ・壁相互作用の研究なども精力的に行われた [15]。

ヘリオトロン E 装置での実験に基づき、炉心プラズマに外挿しうるパラメータ領域でのヘリオトロン概念の定常閉じ込め実証を目指した大型ヘリカル装置 (LHD) 計画がスタートし、1989年に大学共同利用機関として文部省核融合科学研究所が創設された。その主装置として、LHD の建設が始まった。

LHDではヘリカル装置本来の利点である定常プラズマの実証をめざして、超伝導コイルの採用が決定された。プラズマへのアクセシビリティや製作期間などの観点で無難な常伝導にするか、あるいは、挑戦的な研究開発が必要ではあるがヘリカル系の特長を発揮させることが可能となる超伝導にするかの議論が沸騰した。超伝導コイルを採用するという決断は、LHD実験で大きな役割を果たすこととなった。

超伝導ヘリカルコイルの製作途中の様子を図21に示す。日本の科学技術の粋を集め、9年の歳月をかけて建設されたLHDは、当初計画どおりに、1997年度（1998年3月31日）にファーストプラズマ生成に成功し、実験をスタートさせた。世界最大のヘリカル実験装置であるLHDの建設

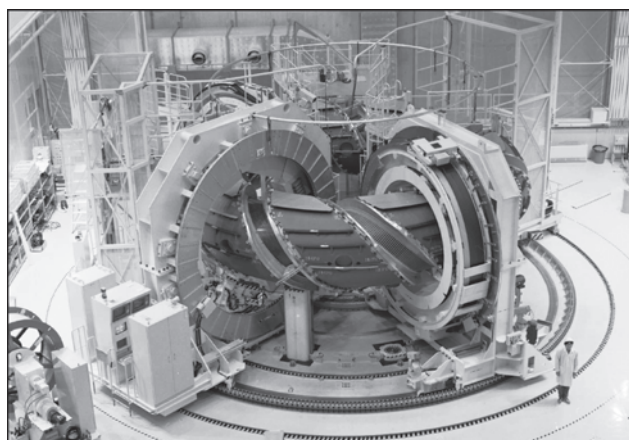


図21 大型ヘリカル装置（LHD）の超伝導ヘリカルコイル建設風景。大型ヘリカル装置の建設には超伝導コイルのR&D開始（1989年）から装置本体完成（1997年）まで、9年の期間を要した。

は、すべての関係者にとって挑戦的なものであったが、それを成功裡に進め、今日の研究進展を実現させたことは、誇るべきことであると思う。図22にLHD装置の外観と真空容器内部の写真を示す。

LHDでは良好な閉じ込め性能とMHD安定性を高ベータ（5%）まで確保することの両立性が設計の課題であった。トラス性に加えてヘリカルリップルが存在することによる新古典拡散、MHD平衡・安定性、および、ダイバータ配位の成立が、設計の主要課題であったが、これらの整合性は、コイル最適化、磁場配位の最適化によって解決された。ヘリオトロン配位は磁場配位のフレキシビリティが高く、磁気軸位置の変化等による輸送の制御とMHD平衡・安定性の制御がうまく機能している。

図23にヘリカル系におけるエネルギー閉じ込め時間のスケージング則が示されている。図にはLHDのデータ以外に、ヘリオトロンE、ATF、CHSなど、他の中型ヘリカル装置と、大型トカマク装置のLモードおよびHモードのデータが示されている。LHDおよびW7-ASのデータがトカマクのHモードとほぼ同等であることがわかる[16]。

図24には、ヘリカル系装置における達成ベータ値の進展が示されている。LHDによって、体積平均ベータ値が急速に進展し、5%を超える領域に到達している様子がわかる。

LHDにおける最近の大きな成果の一つに、超高密度プラズマの実現がある。図25は、トカマク（Alcator C, DIII, PBX）における達成密度が、Greenwald密度限界[17] ($\kappa I_p / \pi a^2$: κ は縦長非円形度、 I_p はプラズマ電流)によって制限されていることを示している。この図に、LHDにおける達成密度をプロットすると、プラズマ電流により生成される安全係数の代替として回転変換を等価的に用い

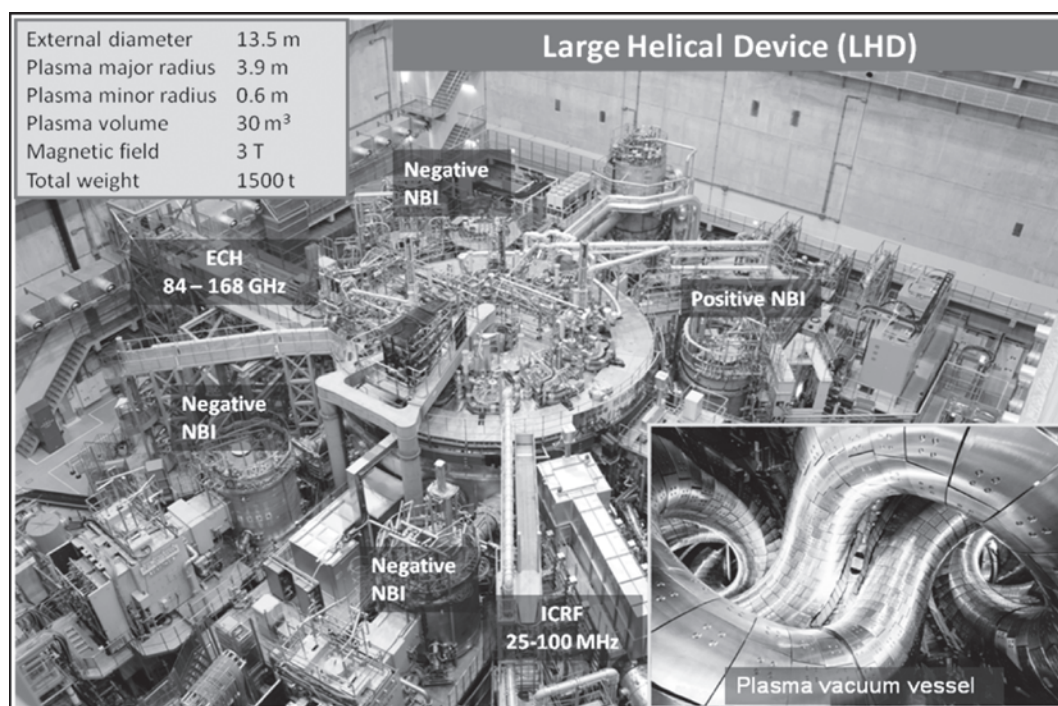


図22 LHDの全景と真空容器内部の写真。超伝導コイルのための断熱真空容器の外径は13.5 mで、周辺に加熱装置、計測装置、ダイバータ装置、真空排気装置が配置されている。広角撮影による真空容器内部の写真（右下）には、2本のヘリカルコイルとダイバータイルを見ることができる。

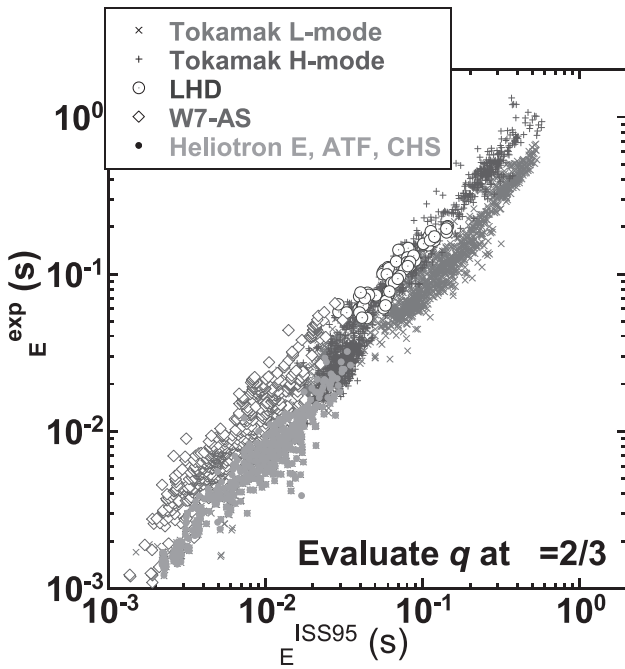


図23 各種ヘリカル系装置におけるエネルギー閉じ込め時間スケールリング (ISS95) と、トカマクの L, H モードにおける閉じ込め時間との比較 [16]: ISS95 スケールリングが、トカマクの H モードとほぼ同等であることが示されている。ISS 95 スケールリングに用いる回転変換の値は、 $\rho=2/3$ の値であり、トカマクのデータをプロットする際には、 $\rho=2/3$ の安全係数の値を用いている。

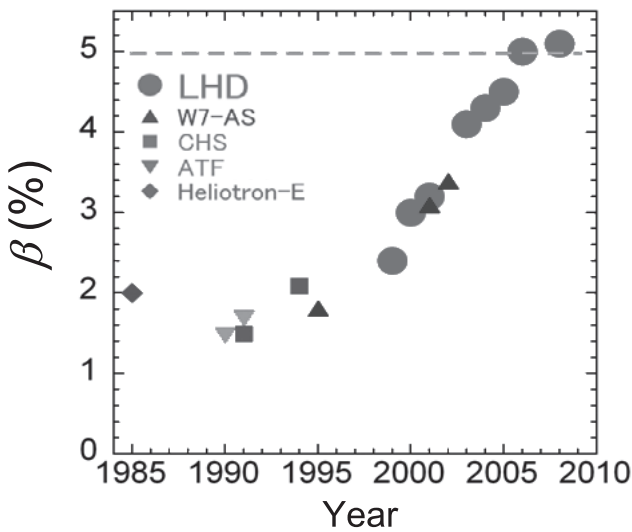


図24 ヘリカル系装置における達成ベータ値の進展 (出典: 核融合科学研究所パンフレット: NIFS2009-2010-太陽エネルギーを地上に-)。LHD 実験の進展によるベータ値の急速な上昇、5% を超える領域への到達が示されている。

た Greenwald 限界を大きく超えていることがわかる [18]。最近の実験では、 10^{21} m^{-3} を超える超高密度も達成されている。W7-AS においても、等価な Greenwald 限界を大きく超えた密度が達成されており、ディスラプションのないヘリカル方式の特長を活用して、高密度プラズマ生成が可能であることが示されている。このような超高密度プラズマは、連続ペレット入射によって実現され、密度分布に障壁が形成されていることが特徴である。内部拡散障壁 (Inter-

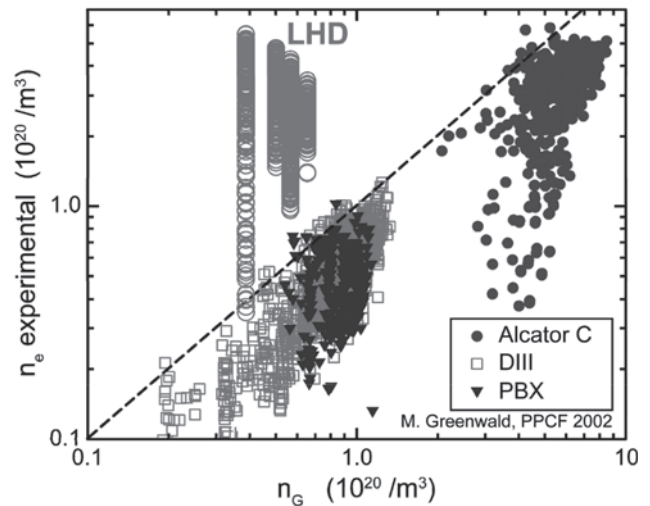


図25 トカマク (Alcator C, DIII, PBX) における達成密度と Greenwald 密度限界。LHD は、等価な Greenwald 密度限界を大きく超えた密度領域のプラズマ生成に成功していることが示されている [18]。トカマクのデータは、M. Greenwald, Plasma Phys. Control. Fusion 44, R27 (2002) から引用されている。

nal Diffusion Barrier) を伴う超高密度コア (Super Dense Core) [IDB/SDC] プラズマを活用した高密度ヘリカル炉心プラズマシナリオの検討も着手されている。

ヘリカル系における各種改善閉じ込めにおける電場の役割に関する知見についても、各種実験装置における計測手法・計測装置の進展、ならびに、理論・シミュレーション研究の進展が相まって、トカマクを包含したトラスプラズマにおける学術的体系化が進んでいることに触れておきたい [19]。

4. 終わりに

本稿では、トカマク、ヘリカル方式等の磁場核融合研究を中心に、核融合研究50年を振り返った。最後に、今後の核融合研究への期待について述べて結びに代えたい。

ITER は、2018年の完成を目標に現在製作設計に入っている。ITER の最大の目的である $Q = 10$ の DT 燃焼は実証されるであろうが、それをより確実にするためには、現在ある JET, JT-60U, (さらに) JT-60SA などにより、長時間の制御を含むプラズマ性能を向上させる新発見を追究する必要があるだろう。トカマクにより、さらに商用炉に進むには電流ディスラプション回避への対策、電流駆動が必要であれば駆動装置の効率と信頼性の向上等が重要な課題として残されている。

ヘリカル方式に関しては、LHD は年々性能を上げている。ヘリカル系が本来持つ定常運転の容易性という核融合炉へ向けた優位性の実証とともに、高ベータ化と良好な閉じ込め性能の両立が示されている。超高密度プラズマの定常化研究などは、定常核融合炉への新しい道筋を明らかにするものであり、今後の成果が期待される。

ミラー方式については、端損失を抑制することに最大限の努力が行われてきたが、逆にその端損失を利用して、 $D-^3\text{He}$ や $p-^{11}\text{B}$ など中性子が出ない核融合反応を用いる直

接発電炉の可能性は残されている。

慣性核融合は、最近になって高速点火概念も実証され、FIREX-I, NIF, LMJの実験開始も間近で、燃焼実験は磁場核融合よりも早く実施されると期待される。実用化に向けては、ドライバーの効率向上、高繰り返し運転をめざした研究を行う必要がある。

この50年間の核融合研究の発展は、すべての関係者の英知と努力の結晶である。この場を借りて、心からの敬意を表したい。

核融合研究の進展をより確実にするには、いくつかの方式の競争が必要である。50年前の核融合研究の草創期のように、若い優れた人材の輩出と参加により、多くの新しい発想が生まれ、既存の方式を超えた、より魅力のある核融合炉へのいくつかの道が開かれることを期待したい。

参考文献

- [1] L.A. Artsimovich, Nucl. Fusion, Suppl. Part I, p.9 (English Trans. p.15) (1962).
- [2] F.H. Coensgen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **35**, 1501 (1975).
- [3] 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, 1972).
- [4] 富田幸博: プラズマ・核融合学会誌 **71**, 481 (1995).
- [5] L.A. Artsimovich *et al.*, Proc. Plasma Phys. Control. Nucl. Fusion Res., Nobosibirsk Vol.1, 17 (1968).
- [6] N.J. Peacock *et al.*, Nature **224**, 488 (1969).
- [7] H. Eubank *et al.*, Proc. Plasma Phys. Control. Nucl. Fusion Res., Innsbruck, Vol.1, (1978) 167.
- [8] J.L. Luxon *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **32**, 869 (1990).
- [9] F. Wagner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982).
- [10] J. Jaquinot *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **41**, A13 (1999).
- [11] A. Sykes *et al.*, Nucl. Fusion **39**, 1271 (1999).
- [12] K.M. Young, Phys. Fluids **16**, 119 (1974).
- [13] J.C. Hosea *et al.*, Plasma Phys. **13**, 365 (1971).
- [14] A. Iiyoshi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **48**, 745 (1982).
- [15] O. Motojima *et al.*, J. Nucl. Mater. **128&129**, 524 (1984).
- [16] H. Yamada *et al.*, Fusion Sci. Tech. **46**, 82 (2004).
- [17] M. Greenwald *et al.*, Nucl. Fusion **28**, 2199 (1988).
- [18] H. Yamada, 2nd ITER International Summer School, AIP Conference Proc. 1095, (Edited by S.-I. Itoh *et al.*), (2009) 178.
- [19] K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama, "Transport and Structural Formation in Plasmas" (1999, Bristol, Institute of Physics Publishing), F. Wagner *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **48**, A217 (2006).