

逆磁場ピンチ方式による磁場閉じ込め核融合の研究

平野 洋一

旧電子技術総合研究所／産業技術総合研究所

[要旨]

電気試験所で 1950 年代の終わりごろから始まった制御熱核融合（人工太陽実現）の研究は、電子技術総合研究所（以下 電総研）、さらに産業技術総合研究所（以下 産総研）に引き継がれて、世界と勝負できる大型実験装置による実験研究を行ってきたが、2007 年度をもって 50 年間続いて来た研究を終了した。ここでは電気試験所から始まる研究の歴史を簡単に紹介した後、1985 年以降は電総研の核融合研究の中心的テーマであった、逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、略して RFP）方式による高温プラズマの閉じ込め実験研究の概要を記述し、研究の進展とその成果について示す。

RFP は磁場による高温プラズマの閉じ込めによる制御熱核融合の一方式である。RFP の特長は磁場の利用効率が高く、弱い磁場で制御熱核融合を達成できる可能性を持っていることである。現在、最も研究が進んでいる Tokamak 方式では、2035 年頃の制御熱核融合の実現を目指して、国際協力で国際熱核融合実験炉（International Thermo-Nuclear Fusion Experimental Reactor, 略して ITER、<http://www.iter.org/>）の建設が進められているが、ITER ではプラズマを安定に閉じ込めるために 10 テスラーを超える強力な磁場を用いている。一方、RFP では 3 テスラー程度の磁場で制御熱核融合を達成する可能性が示されており、将来の核融合発電炉の経済性向上への貢献が期待されている。

そのため、OECD 傘下の IEA のもと、逆磁場ピンチ国際研究協力実施協定が結ばれ、国際研究協力が進められてきた。RFP は内部磁場の構造が複雑で、磁場配位の形成・維持が難しいところがあったが、国際研究協力のもと、数十ミリ秒のゆっくりした配位形成法と 100 ミリ秒以上（世界記録はイタリアの 400 ミリ秒）の配位維持を実現できるまでになった。

当所は、それまで数マイクロ秒オーダーの磁場変化で行われていた RFP の高速配位形成を、その 100 倍程度のゆっくりとした、0.2 ミリ秒程の低速で形成する手法の開発に、TPE-1 RM 装置を用いて成功し、さらに、約 600 万度という高い温度を RFP では世界で初めて達成した。その後、TPE-1RM15 装置で、2 ミリ秒の程の低速配位形成と 1000 万度の達成、TPE-1RM20 と TPE-RX 装置で、磁場の利用効率の 20%への向上と、100 ミリ秒を超える配位維持を実現するなどの多くの成果を上げた。ここでは、当所における逆磁場ピンチ装置の履歴とその特徴、並びに、得られた成果について順次記述して行く。

当所における RFP の研究を、プロジェクトレビューとしてまとめたものと[1]、少々古いですが世界の RFP の閉じ込め改善の研究をレビューしたものを[2]、プラズマ・核融合学会誌に掲載したので、詳しい物理的な内容にご興味の有る方はご覧いただきたい。なお、TPE-1RM15 までの研究については文献[28]に詳しく記述されている。

[始めに]

最初に、この分野がどのようなものかご存じ無い方が居られると思うので、先ず、制御熱核融合とはどのようなもので、これにより人工太陽が実現されるとエネルギー供給にどのような利点があるか、その実現に解決が必要な問題は何で、何が難しいかを簡単に説明したい。

ただし、最初の第1章の「制御熱核融合とは」については、大学卒業以降は一般的な制御熱核融合の解説書を、まともに読んでいなかったもので、関連した最近の参考文献を上げることが難しかった。ウェブで見たところ、プラズマ・核融合学会から「プラズマエネルギーのすべて」という入門書が出ていることが分かった。ブルーバックスにも解説書「新核融合への挑戦」があったと思う。核融合について詳しくお知りになりたい方は、ご覧いただければと思う。

1. 制御熱核融合とは

核融合研究とは、一言で言えば、人工のミクロな太陽を地上に作ることを目指す研究である。太陽をはじめとする宇宙の殆ど全ての恒星は、水素原子4個を融合してヘリウム原子に変換する核融合反応を、その光り輝くエネルギー源としている。

水素の原子核（陽子）を超高温に保つと（太陽の中心で約1500万度、恒星では数億度に達すること）、高速の熱運動を行うことにより、陽子どうしはその正電荷の反発力を乗り越えて、陽子の大きさ程度以下にまで近づく。そうすると陽子間に大きな核力が働き二つの陽子がくっ付いてしまう融合反応をおこす。これを短時間に繰り返すことにより、4個の陽子から、2個の陽子と、2個の中性子が一緒になったヘリウム原子核と、2個の陽電子が生成される。

生成されたヘリウム原子核は周りにある2個の電子とともにヘリウム原子となり、2個の陽電子は、水素原子の電離により発生して周りに存在する2個の電子と対消滅する。この核融合反応には質量欠損があり、それがヘリウム原子核の運動エネルギーと電子の対消滅の輻射エネルギーとして放出される。これが、宇宙の全ての輝く恒星の中心部で起こっていることであり、核融合は宇宙の最も重要なエネルギー源とすることができる。

ただし、水素原子4個からヘリウムを作る核融合反応は、その反応率が非常に小さく、単位質量当たりの発生エネルギーも大変に小さい。太陽などの恒星は超巨大な質量を持っているので、この小さい発生エネルギー密度でも、星全体で総和をとれば莫大な量のエネルギーを生成することができる。もちろん、人工太陽ではこの様な巨大な質量を用いることはできないが、幸いなことに、水素の同位体である重水素（原子核が陽子1個と中性子1個からなる）と三重水素（陽子1個と中性子2個からなる）では、その混合体の密度を、それぞれが $10^{20} [\text{m}^{-3}]$ 程度になるように保って、1億度以上の超高温にまで加熱すれば、重水素と三重水素が融合して、中性子とヘリウム原子に変換する核融合反応を起こすことができる。このぐらゐの密度と温度を、地球上で生成することは、簡単ではないが不可能ではない。もしその状態を保持することができれば、大きなエネルギーを発生させることができ、実用的なエネルギー源として用いることが可能である。従って、人工太陽の研究では、最初のステップとして重水素と三重水素の核融合反応を用いた熱核融合炉の実現を目標としている。

1-1. 高温プラズマの閉じ込めの必要性

電離した水素イオンと電子の混合流体を水素電離プラズマ（ここでは略してプラズマと呼ぶ）は、恒星の中心部では超高温のためほぼ 100%の電離度となっている。そのような超高温プラズマを保持することで、核融合反応が継続して起こるのであるが、そのためには、核融合反応自体で生成したエネルギーを、恒星の中心部に閉じ込めることが必要である。化学の言葉を借用すれば、いわゆる燃焼と呼ばれる状態を持続しなければならない。恒星は自らの膨大な質量が作り出す強力な重力で、超高温プラズマを中心に閉じ込め、エネルギーの損失を抑えている。この核融合燃焼反応を恒星より遥かに小さな規模で、地球上で人間が制御できるようにして実現し、エネルギー源として利用しようとするのが、制御熱核融合である。

1-2. 慣性核融合

人類は最初、水素の核融合燃焼反応を水素爆弾として用いることを考え開発を始めた。その際にも、核融合燃焼反応の実現が容易な、重水素と三重水素の核融合燃焼反応を用いた。水素爆弾の開発は、それ以前に成功していた核分裂を用いた原子爆弾の実現から、それ程時間がかからず進展し、水素爆弾を実現することができた。このことから、制御熱核融合研究の初期には、核融合燃焼反応炉の実現は、それ程難しくはないのではないかと楽観された。しかし、予想と違って超高温プラズマを一定の空間に閉じ込めることは大変難しく、核融合研究が始まってから 70 年程経過した今でも、必要な閉じ込め値にかなり接近はしているものの、十分な閉じ込め性能は実現されていないのが現状である。

水素爆弾の場合には、非常に短い時間内で超強力なパワーを発生する原子爆弾をトリガー装置として用いるので、超高速の衝撃的な圧縮と加熱が可能である。それにより、加熱による膨張で水素が飛び散る前の短時間に圧縮加熱が急速に進み、核融合反応が大量に起こって爆発する。従って、加熱された水素プラズマは極短い間だけ閉じ込めておけば良く、それには圧縮された水素プラズマが再度膨張するまでの加速時間、即ち、自身の慣性によって留まっている時間で十分である。

この考えを核融合の平和利用に応用したものが慣性核融合炉である。そこでは原子爆弾の代わりに強力なレーザー光を四方八方より非常に小さな標的に打ち込み、爆縮をさせて 1 億度を超える超高温で、固体の千倍近い超高密度を持つ水素プラズマを作り、それが熱膨張で飛散してしまう前に核融合燃焼反応を起こして、反応を起こすために必要なエネルギーより大きなエネルギーを生成する。言い換えれば、水素爆弾の百万分の一以下のスケールの超ミニ水爆を、レーザー照射により生成してエネルギーを得ようとするものである。

この慣性核融合燃焼反応の実現を目指した爆縮実験が、米国のロスアラモス研究所で 20 世紀の末頃から開始された。しかし、爆縮中心の密度が予定の大きさまで到達せず、核融合燃焼反応の実現には至らなかった。その後、現在まで様々な改良がおこなわれて、爆縮させるために使用したレーザー光の、ターゲットへの入射エネルギーを超えるアウトプットを得られるようになったと聞いている。しかし、レーザーを発振するために必要なエネルギーを超えるアウトプットを得たというアナウンスは未だない。現在、慣性核融合に使用しているレーザーの発振効率は大変小さく（数%以下と聞いている）、この点の改善が大きな課題で

あると思う。筆者は、慣性核融合研究は専門外なので、最近の成果についてはこれ以上の説明はできない。御興味をお持ちの方は、Lawrence Livermore 国立研究所、Los Alamos 国立研究所、あるいは大阪大学のレーザー研究センターのウェブサイトをご覧ください。

1-3. 磁場閉じ込め核融合

一方、磁場閉じ込め核融合は、地上で、太陽と同じように超高温プラズマを閉じ込めて核融合燃焼反応を実現しようとするものである。しかし、当然のことながら高温のプラズマの閉じ込めには、太陽が用いている重力は使えない。もちろん、普通の容器に閉じ込めることは不可能である。そこで、荷電粒子の集まりであるプラズマを、磁場を用いて閉じ込め、核融合反応による燃焼状態を維持しようとするものである。

核融合プラズマは水素イオンと電子という荷電粒子で構成されるので、適切な磁場構造を用いると、ある一定の領域に閉じ込めることができる。荷電粒子は磁力線に巻き付いて運動する性質があるので、磁力線に垂直方向には非常に動きにくく、垂直方向の膨張は効果的に抑えることができる。しかし、磁力線方向の運動には磁場の影響は小さく、荷電粒子は磁力線方向にはかなり自由に運動することができる。この影響もあって、磁場による閉じ込めは完全ではなく、閉じ込め領域からの無視できない割合の損失が存在する。

初期の核融合研究では、この損失として荷電粒子間の衝突によるものだけを考えていたので、制御熱核融合に対して楽観的な見方が広がり、1950 年代には実験が成功したという誤報が何度か出るようになった。しかし、現実には厳しく、現在に至るも十分な閉じ込め性能は達成されていない。今のところは、国際協力でフランスに建設中の、Tokamak 型のプラズマ閉じ込め装置、国際熱核融合実験炉（International Thermo-Nuclear Fusion Experimental Reactor, 略して ITER、<http://www.iter.org/>）で、2030 年頃から開始される研究を待っているところである。重水素と三重水素の核融合燃焼実験は 2035 年頃より開始の予定である[3-6]。

ITER の研究で核融合燃焼の実現が順調に行けば、その後に、次の世代の核融合炉の試作を行うことになる。ITER は、核融合燃焼反応の実証が中心課題で、エネルギーの取り出しは試験的に行うだけである。次のステップとしては、本格的なエネルギーの取り出しを目的とした炉の試作が必要である。経済性をも考慮に入れた実用的な核融合発電炉の建設は、さらに、その次と言うことになり、まだまだ時間はかかりそうである。ミクロな太陽を地上に作るという壮大な夢の実現には、これくらいかかっても仕方がないのではないかと思う。

1-4. 核融合のメリット

核融合炉の最大のメリットは、燃料の重水素が海水から採れるので埋蔵量が莫大であること、また、三重水素の原料となるリチウムも、海水から抽出したものでも経済的に引き合うと予想されているので、燃料の埋蔵量の心配はないということである。

核融合燃焼反応を持続して行うためには、プラズマを 1 億度以上の超高温に保持する必要があるが、当然ながらその状態を保つことは容易ではない。従って、何かトラブルが起こった時には大気圧の窒素ガス、あるいは、より安全を期すなら、ヘリウムガスを炉内に注入すれば、その密度が炉内のプラズマの 10 万倍程であるので、炉内の温度は急速に低下し核融

合反応は速やかに停止する。従って、核反応の暴走の危険はない。

核融合反応の生成物はヘリウム原子核（ α 粒子）と中性子であるが、ヘリウムは放射能を持たないので、分離すれば大気に放出することが可能である。中性子は様々な物質に吸収されて放射性同位元素を生成するので、それらの処理をどうするかは大きな問題であるが、核融合炉では中性子減速材の材料として、中性子照射による誘導放射能の処理が容易な物質を選ぶことが可能で、生体に取り込まれやすいものや、極端に長い半減期を持つものの生成を抑えることが可能である。また、適切な半減期を持つ材料を使えば、炉の停止直後の過剰な崩壊熱の発生を低減することが可能であり、炉心溶融の可能性を小さくすることができる。

ただし、核融合炉では燃料の三重水素を炉自体で生産する必要があるため、核融合燃焼反応が起こっている高温の中心部分を保持する炉の第一壁の外側に、中性子と反応して三重水素となる原料のリチウム化合物を、中性子遮蔽材として大量に用いる必要がある。そのため、炉が壊れると、漏れたリチウム化合物の発火や、生成された三重水素が炉の外へ大量に漏れ出す可能性があり、これについては、特別の対策を考慮する必要がある。

1-5. 磁場閉じ込め核融合研究の課題

磁場閉じ込め核融合に要請される超高温プラズマの、閉じ込め性能はどのようなものであるか、以下に簡単に評価する。核融合燃焼反応が維持されるためには、核融合燃焼反応で生成されるプラズマ加熱エネルギーが、超高温プラズマから失われるエネルギーとバランスして、超高温状態が維持されることが必要である。重水素と三重水素の一個の核融合反応で発生するエネルギーは $E_f = E_n + E_\alpha$ と表される。 E_n は反応で発生する中性子の持つエネルギー、 E_α は発生するヘリウム原子核（ α 粒子）の持つエネルギーで、

$$E_n = 14.06 \text{ [MeV]} = 2.252 \times 10^{-12} \text{ [J]},$$

$$E_\alpha = 3.52 \text{ [MeV]} = 5.64 \times 10^{-13} \text{ [J]}$$

である。発生した中性子は、殆どプラズマとは反応せず閉じ込め領域の外へ飛び出し、そこでリチウムを含む減速材と衝突してエネルギーを失い減速材を加熱する。この加熱された減速材を冷却材で冷却することにより熱を取り出す。従って、中性子は閉じ込め領域の超高温プラズマの加熱には寄与しない。一方、 α 粒子は電荷を持つので、磁場によりプラズマ閉じ込め領域の中に閉じ込められ、閉じ込め領域内の重水素イオンや三重水素イオンと衝突して、エネルギーを失いプラズマを加熱する。

核融合燃焼プラズマでは、この加熱によりプラズマが超高温に維持される。核融合燃焼プラズマのイオン密度を n として重水素と三重水素の密度が等しいとすると、閉じ込め領域の核融合燃焼反応で生成する単位時間当たりの α 粒子エネルギーは、

$$W_\alpha = E_\alpha (n/2)^2 C_f V$$

となる。ここで C_f は核融合反応率で、プラズマの温度の関数であり、 V は核融合燃焼プラズマの体積である。一方、プラズマから失われるエネルギーは、エネルギーの閉じ込め時間を τ_E とすると、プラズマの絶対温度を T 度（イオンと電子で等しいと仮定）として、イオンと同数の電子の存在を考慮に入れると、

$$W_{\text{loss}} = (3/2) 2n k_B T V / \tau_E$$

となる。 k_B はボルツマン定数である。これが W_α と等しくなるためには、

$$E_\alpha (n/2)^2 C_f V = (3/2) 2n k_B T V / \tau_E$$

となる必要がある。ここでは簡単のため、加熱効率は100%とした。これから、

$$n \tau_E = 12 (k_B T / C_f) / E_\alpha$$

が導かれる。温度を ~ 10 [keV] ~ 1.16 億度とすると、 C_f が $\sim 2 \times 10^{-22}$ [m³/sec]なので、

$$n \tau_E \sim 2 \times 10^{20} [\text{sec/m}^3]$$

となる。これが、核融合燃焼反応が連続して継続するために必要な値である。 τ_E が1秒とすると

$$n = 2 \times 10^{20} [1/\text{m}^3]$$

となる。

恒星の様に重力で高温プラズマを閉じ込めているのと違って、磁力で閉じ込めている地球上の磁場閉じ込め核融合装置では、必要な閉じ込め時間を実現することが大変難しい。それは、ミクロな粒子間の衝突による熱伝導が主要なメカニズムである固体とは違って、プラズマのような流体からの熱損失では、乱流や対流等の、マクロな流体の流れによる熱の流れが主要な要因となっているためである。これは大気中の熱の流れが、空気中の分子間の衝突による熱伝導ではなく、上昇気流や風の流れにより決まることと同じである。

しかも、核融合プラズマでは、反応を担うイオンの流れだけではなく、電子の流れをも考慮する必要がある。従って、イオンだけではなく、電子もうまく閉じ込めなければならない。どちらかだけの閉じ込めが良いと、その粒子の持つ電荷が過剰に残ることになり、その結果生じる静電場に引っ張られて、最終的には閉じ込めの良い粒子も飛び出してしまう。

電子はイオンより数千分の1の重さなので、その熱運動の速さは重水素イオンの約60倍、三重水素の約74倍である。熱運動の速度が早いということはエネルギーを持ち去る速度も速いということである。これらのことから、核融合燃焼反応の維持に必要な閉じ込め時間を得るのが非常に難しい。磁場閉じ込め核融合の研究開始から50年近く過ぎた、前世紀の終わり頃になって、漸く核融合燃焼反応に必要な値 $n \tau_E \sim 2 \times 10^{20}$ [sec/m³]を実現できる見通しを得られた。

条件は密度と閉じ込め時間の積なので、密度を上げれば必要な閉じ込め時間は短くなる。また、反応率はプラズマの温度上昇により増加するので、高温のプラズマを用いれば上記の $n \tau_E$ 値は小さくできる。しかしここで、もう一つの条件、必要な磁場の強度の制限を考える必要がある。プラズマの圧力 $2n k_B T$ と閉じ込め磁場の磁気圧 $B^2/(2\mu_0)$ の比を β 値と呼び、

$$\beta = 2n k_B T / (B^2/(2\mu_0))$$

で定義する。ここで μ_0 は真空の透磁率である。もちろん β 値は1を超えることはできないが、 β 値が1に近いほど弱い磁場で、同じ温度と密度のプラズマを閉じ込めることができる。 β 値はいわば核融合炉の磁場の利用効率の指標である。

現在、最も良い閉じ込め性能を持っているTokamak方式の大型閉じ込め実験装置では、 β 値はせいぜい3%ぐらいなので、1億度で 2×10^{20} [m³]の密度のプラズマを閉じ込めるには、平均的には5テスラ(5 [T])程度の大きな磁場強度が必要となり、装置の中心部ではその2倍の10 [T]程の非常に強い磁場を用いる必要がある。建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)

では、巨大な超電導電磁石で閉じ込め磁場をつくっているが、それらのコイル群の建設費が全体の 7 割以上を占めている。もし β 値を 10 倍にすることができれば磁場強度は 1/3 に下がり、大幅な建設費の低減が期待できる。即ち、将来の発電炉を考えた時、大きな経済性の向上が望める。

以上の 2 点、閉じ込め性能と β 値の向上が、最も基本的な課題であるが、それ以外にも、数か月以上の長時間にわたる超高温の核融合燃焼プラズマの維持と装置の冷却法の開発、リチウムからの三重水素の生成と取り出し法の開発、中性子による炉材料の放射化とその劣化、及び誘導放射能の蓄積に対する対策などの開発が、炉を考えた時には必要である。

2. 磁場閉じ込め核融合研究の歴史

産総研における核融合研究の歴史に触れる前に、世界における磁場閉じ込め核融合の歴史について簡単に説明したい。ただし、筆者は慣性核融合については専門外で詳しくは知らないで、ここでは、磁場閉じ込め核融合に限定させていただく。さらに、現在、磁場閉じ込め研究の主流である、Tokamak 型の閉じ込め方式については、実験に参加した経験は退職後の 2 年間と短いので、ここ 10 年間程の、最近の研究成果の詳細については良く知らないことをお断りしておく。

先にも述べたように、世界で最初の人類による重水素と三重水素の核融合燃焼反応は、水素爆弾と言う形で 1950 年代に実現した。この反応はごく短時間に大量のエネルギーを放出する核爆発と呼ぶべきもので、もちろん平和的な通常のエネルギー源としての利用は不可能である。通常のエネルギー源として用いるためには、反応時間を何桁も長くする必要がある。当初は、反応時間を延ばすのはそれ程難しくないと考えられたので、核融合の平和利用の実現は、1950 年代中にすぐにも実現できると考えられた。

しかし、現実には厳しく、マイクロ秒オーダーで急速に増大する磁場を用いて、プラズマを急激に圧縮することにより、小規模な装置でも核融合反応を起こして、中性子を発生させることはすぐに実現したが、そのためには反応で発生するエネルギーと比べて、桁違いに大きなエネルギーを注入することが必要であった。

先にも述べたように、磁場で閉じ込められる高温プラズマには、その圧力が閉じ込め磁場の磁気圧よりは小さくないといけないという制限がある。しかし、超電導コイルで発生可能な磁場強度には限界があるので、プラズマの温度を 1 億度以上に保つためには、使用できる密度が制限されることになる。核融合炉の条件では大体 $n \sim 2 \times 10^{20} [\text{m}^{-3}]$ 程度が適当であり、これ以上の高密度は難しい。従って、 $\tau_E \sim 1 [\text{sec}]$ 以上の閉じ込め時間が必要であることが分かる。この値を実現するため、様々な磁場配位が考えられたが、現在では、図 1 と 2 に示すドーナツ状の磁場配位、これをトーラス配位と呼ぶが、この磁場構造が最も有望なものであると考えられている。

磁場の中では、水素イオンや電子のような電荷を帯びた荷電粒子は、磁力線に巻き付きながら、磁力線方向に動く回転螺旋運動を行う。この運動をサイクロトロン運動と称するが、強い磁場のもとではサイクロトロン運動の回転半径は十分小さくなるので、磁力線と直角方向には、荷電粒子は大きくは移動しにくい。一方、磁力線と平行方向には、直接的には磁場

による力を受けないので、大きく動くことが可能である。そのため、荷電粒子の集まりであるプラズマを磁場で閉じ込める際には、磁力線に平行方向の損失を抑えることは、垂直方向の損失を抑えることよりはるかに難しい。従って、閉じ込め領域の磁力線が、何処かで閉じ込め容器の壁を横切るような配位をしていると、プラズマの損失を抑えることは非常に難しいことになる。

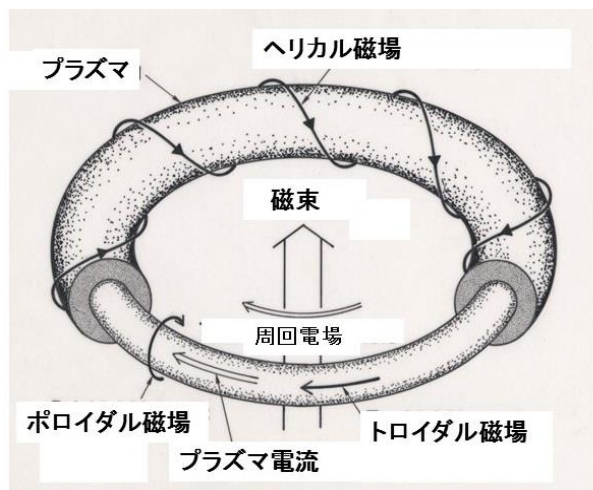


図1 核融合磁場閉じ込め装置 基本的磁場構成
トーラス配位
トロイダル方向とポロイダル方向を示す

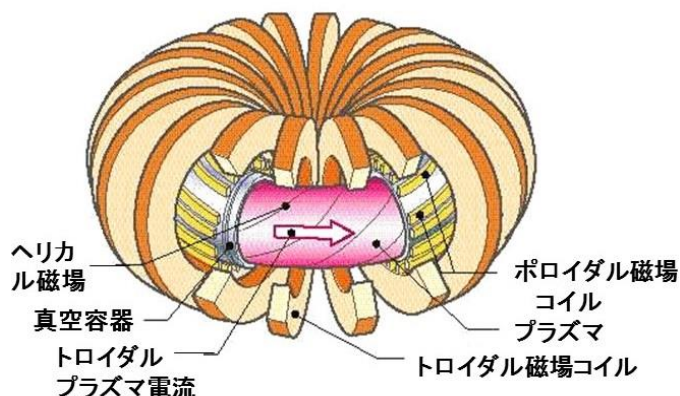


図2 トーラス配位 磁場発生用コイルの配置
トロイダル磁場発生用のトロイダルコイル、
ポロイダル磁場発生用のポロイダルコイル、
プラズマを閉じ込める真空容器を示す

それを逃れるためには、端がないように円環状に繋いだ磁力線を束ねて用いるトーラス型（ドーナツの形状）の配位を用いることが、最も単純で、しかも有効な方法である。現在のプラズマ閉じ込め装置は、外見はともかく、閉じ込め領域では、全て閉じたトーラス状の磁力線でプラズマを閉じ込めている。この様な磁場配位を作ることは難しくなく、図2で示したように、トロイダル磁場コイルと呼ばれる、コイルの巻線を中空の円盤状に巻き重ねた、リング状の磁場作成用のコイルを、中空がドーナツ状になるように並べた電磁石で、ドーナツの大円方向の磁場（トロイダル磁場）を発生する。図は非常に強力なトロイダル磁場を使用する Tokamak 方式の装置を念頭に置いているので、大きくて頑丈な多数のトロイダル磁場コイルが描かれている。

トロイダル磁場だけで閉じ込め磁場ができれば簡単で良いのであるが、残念ながらそうはいかず、様々な理由から、ドーナツの小円方向に巻き付く磁場（ポロイダル磁場）も必要で、このポロイダル磁場をどのようにして発生するかが大きな問題である。一つのやり方は、トーラス状のプラズマの中に大円方向に電流（トロイダルプラズマ電流）を流し、その電流で小円方向のポロイダル磁場を作るものである（内部電流型トーラスと呼ばれる）。Tokamak 方式や、この解説でこれから述べる産総研で用いられた逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、RFP）方式などがこの方法を用いている。また、核融合科学研究所では、トーラスの小円方向に巻き付きながら、大円方向に一周する螺旋状のコイル（ヘリカルコイル）で、トーラス

の閉じ込め領域にトロイダルとポロイダル両方の成分を持つヘリカル磁場配位を作り出す、ヘリカル方式と呼ばれる磁場配位を用いている（外部電流型トーラスと呼ばれる）。

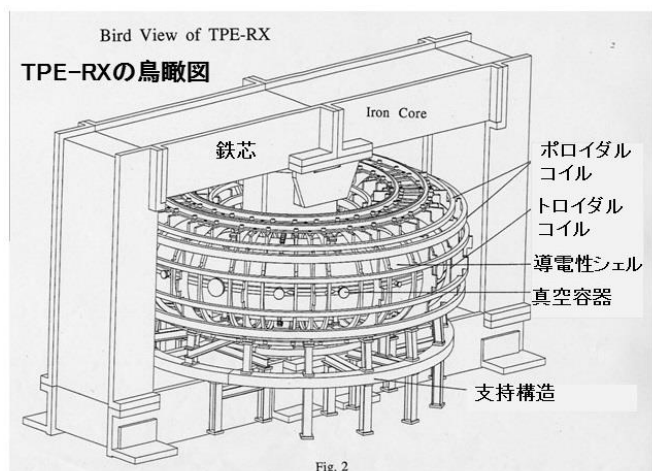


図3 大型逆磁場ピンチ装置 TPE-RXの鳥瞰図
トロイダルコイル、ポロイダルコイル、真空容器
鉄芯、導電性シェル、支持構造を実物に沿って示す

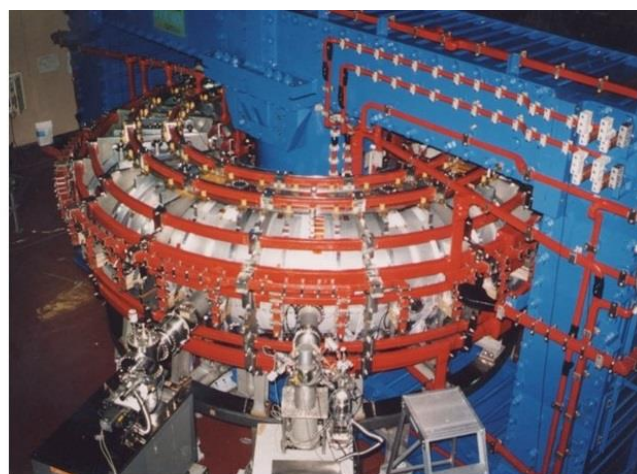


図4 大型逆磁場ピンチ装置 TPE-RXの斜め上からの写真
図3の鳥瞰図に対応、逆サイドから撮影
大円に一周する赤茶色のコイル群がポロイダルコイル
内側の小円方向に一周するアルミの薄板製コイルが
トロイダルコイル、大きな銀色のドーナツがシェル
真空容器はシェルの中で、外に出る枝管しか見えない

図3と図4に実際に使用された、磁場閉じ込め核融合研究のトーラスの実験装置の一例として、産総研の大型実験装置 TPE-RX の、鳥瞰図と写真を示した。これらの図から、実際の実験装置がどのようなものであるかがお分かり頂けると思う。TPE-RX では、鉄芯の大きさは高さが 4.4[m]、横幅が 7.9[m]程で、コイルも含めたトーラス全体の大半径が 2.05[m]、小半径が 1.1[m]程である。

2-1. Tokamak 型磁場閉じ込め装置と T-3 の成果

現在、最も成功し、次期装置 ITER で核融合燃焼反応を達成する可能性を持っているのが Tokamak 方式である。しかし、Tokamak のような内部電流型にはいくつかの問題がある。その中で物理的に大きな問題は、プラズマと言う非常に軽くて変形しやすい流体の中に大電流を流すため、激しいプラズマの変形がおこってしまう電磁流体不安定性が発生して、極端な場合にはプラズマが容器壁に当たって消えてしまう、そうでなくても急速なエネルギーの損失を招いてしまう状態になりやすいことである。さらに、技術的には、核融合炉の長い運転時間の間、どの様にしてプラズマ電流を一定に保持するかということも大きな課題である。

1950 年代の研究の初期には、英国の ZETA 装置などの内部電流型装置では、激しい電磁流体不安定性を制御することができず研究は頓挫してしまった。ソ連で行われていた、T-3 という装置を用いた Tokamak 方式の実験でもこの不安定性に悩まされていたが、トロイダル磁場を大きくし、逆にプラズマ電流を小さくして行くと、不安定性の激しさが緩やかになってゆくことが観測された。それでも、不安定性が完全に安定化されて消えることはなく、高温プラズマの閉じ込めには至らなかった。

筆者の属していた現代の日本社会の研究所なら、このような状態が1年も2年も続けば、実験をやめて、次の他の方法を考えるところであるが、T-3の実験を指揮していたアルシモビッチ博士は、この実験を1年以上休まず継続した。そうすると、実験を続けているうちに残っていた不安定性が次第に沈静化し、それと伴に、プラズマ中のトロイダル電流を一定に保つために必要な大円方向の周回電圧（トロイダル電圧）が次第に低下した。そして、ついには残っていた不安定性も安定化して、その揺動の大きさが従来とは桁違いに小さくなる状態を実現することができた。

トロイダル電圧の低下はプラズマの電気抵抗の低減を意味する。電離気体であるプラズマは、もちろん導電性であり電気抵抗を持つが、電気抵抗の大きさはプラズマ中の電子の温度の $3/2$ 乗に逆比例するので、電子温度が上昇すると電気抵抗が減少し、電流を一定に維持するために必要な電圧が低下する。また、水素プラズマ中に残存する不純物が電離して発生する多価イオンと、電子との衝突の増加によっても、電気抵抗は増加する。不純物としては、酸素、炭素、窒素といった軽元素不純物と、容器のステンレス鋼に含まれる鉄やニッケルなどの金属元素不純物が考えられる。いずれも容器壁にあるものが、閉じ込め領域から漏れ出したプラズマに打たれて発生するものである。従って、電気抵抗の低下は、プラズマ電子温度の上昇か、不純物混入の低減、あるいはその両者が起こっていることを示している。

T-3のグループは高い電子温度を直接測定する計測器を持っていなかったので、適当な実効イオン電位の値を仮定して、電気抵抗から電子温度を算出すると数百万度という、従来の実験では得られなかった、非常に高い値を得た。この結果を国際会議で発表したところ大変な騒ぎとなったが、多くの研究者は、最初は、電気抵抗から算出した電子温度の値が間違っているのではないかと疑った。というのは、T-3と類似の装置で低密度の実験を行うと、ごく一部の電子だけが数十 keV 以上にまで異常に加速されてトーラスの大円方向に回転し、それがトロイダル電流となるため、イオンとの衝突が減って電気抵抗が減少することが観測されていたからである。ただし、その場合には、残りの大多数の電子は低温のまま残され、さらに高速電子の一部が閉じ込め容器に衝突して、強いハード X 線が発生することが知られていた。しかし、T-3 ではその様な強いハード X 線は観測されなかった。

そこで、その当時、英国で開発が進んでいた、強力なルビーレーザー光をプラズマ中に入射して、電子との衝突による散乱光の波長のドップラー広がりから、電子温度を測定する手法（これをトムソン散乱法と呼ぶ）を用いた国際共同実験が、英国のカラム研究所とソ連のクルチャトフ研究所とで実施された。その結果、T-3 では本当に高い電子温度が得られていることが実証された[7]。

2-2. T-3 装置の成功の要因、電磁流体不安定性の安定化と輻射障壁の突破

何故このような成果を実現できたかについては、色々考えられたが、今となって見れば、以下の2点が重要であった。

先ず、電磁流体不安定性の理論的な解析手法の進展により、トーラス配位ではポロイダル磁場を作るトロイダル電流の値に、強い制限があることが示された。即ち、プラズマの表面のポロイダル磁場の大きさは、トロイダル磁場の $1/10$ 程度以下に制限される。（ただし、ト

ーラスの大円の半径 R と小円の半径 a との比が、通常の Tokamak で広く用いられる $R/a \sim 3$ 程度であると想定した場合。) これを超えてポロイダル磁場が大きくなると、不安定性が発生し大きな磁場揺動が現れる。特に、 $1/3$ を超えると非常に激しい不安定性が起これりプラズマは消滅する。従って、Tokamak ではこの限界を超えないようにトロイダル電流の大きさを制限しなければならない。

しかし、実験ではこの限界以下である低電流領域でも不安定性が発生してしまった。今では、その原因がプラズマに混入する不純物、特に、酸素などの軽元素不純物であることが分かっている。一般に核融合研究装置の真空容器はステンレス鋼を用いて製作される。Tokamak の様に真空容器中のプラズマに電流を流す場合には、外部から電圧をかける必要があるが、容器の導電性が大きいと、電圧をかけても容器にばかり電流が流れて電場を遮蔽してしまい、内部のプラズマには電流が流れないことになる。そのため真空容器には、容器の電気抵抗を大きくするため、薄い板状のステンレス鋼板をベロー状に加工した円筒を、トーラス形状になるように溶接して用いる (図 8 参照)。

真空容器製作後には、様々な溶剤で洗浄を行うが、ベロー状の波打つ表面なので、内面に付着した炭素系の不純物や水分、それに容器表面に吸着した酸素を完全に取り去ることは難しい。容器を 250 度 C 程に加熱して排気する、いわゆるベーキングによりこれらを取り去るが、それでも、完全に取り去ることはできない。さらに、容器内面に吸着した酸素は、その吸着エネルギーが比較的高いので、ベーキングでは取り去ることはできない。

また、プラズマの周辺部に混入した酸素は、付近の電子との衝突で励起されて発光する。これらの光はプラズマに再吸収されることなく容器壁に到達して吸収されるので、電子のエネルギーが光の放射という形で失われることになる。これは酸素が完全電離するまで続くが、容器壁近辺の低い電子温度では、酸素は完全電離することは無く、光の放出は続くことになる。特に酸素を主とする軽元素では、電子衝突による発光の放射率が、電子温度が数十 [eV] 付近に大きなピークを持つので、酸素の濃度が高いと放射損失が大きくなり、プラズマの周辺部の温度が 10 [eV] 前後の、低温度にとどまってしまう。これが軽元素 (主には酸素) による輻射障壁と呼ばれるものである。酷い時には、プラズマ全体でこの障壁を突破できず、電子全体が 10 [eV] 前後という低温度にとどまる状態が生じる。

そうでない場合でも、輻射障壁により周辺の電子温度は上昇せず、温度が上がるのは中心部だけとなってしまう。そうすると電気抵抗は周辺で大きく、中心では小さくなるので、中心に電流が流れやすくなり電流が中心に集中する。そのためプラズマの実効的な小半径が小さくなったことになり、そこでのポロイダル磁場の大きさが安定性の限界を超えてしまい、電磁流体不安定性が発生してプラズマの閉じ込めが悪化する。

これを防ぐためには、容器内面の吸着酸素を取り去って、酸素で覆われていないフレッシュ表面の状態を実現することが必要である。その状態でなければ、意味のある閉じ込め研究を行うことができない。そこで、容器内面の吸着酸素を取り去る手段として用いられているのが、放電洗浄である。これは数秒ごとに微小電流で、電子温度の低い放電を高い頻度で繰り返し、これを数日間程行って数十万回の放電により、容器壁から酸素をたたき出そうとするものである。これにより酸素で覆われていないフレッシュな金属容器壁の状態を作り、プ

ラズマへの酸素の流入を防止して輻射障壁を突破することが可能となる。

容器内で微小電流放電により水素プラズマの生成を行うと、電離して生成された電子の一部は容易に酸素の吸着エネルギーより高いエネルギーまで加熱されるので、それらの電子が容器壁に入射すると、容器内面に吸着している酸素が壁からたたき出される。また、プラズマの周辺には電離していない水素が存在するが、それらの水素は電子衝突により励起されて、真空紫外光の $H\alpha$ 線を放射する。 $H\alpha$ 線のエネルギーは 10.3 [eV] なので、酸素の吸着エネルギーより高く、 $H\alpha$ 線が容器壁に入射されることによって酸素が放出される。

この方法は大成功をおさめ、その後の、Tokamak だけではなく多くの磁場閉じ込め実験装置の真空容器壁のコンディショニングの基本となった。現在では、真空容器の表面に吸着された不純物を取り除く方法として、様々な放電洗浄のやり方、例えば低気圧の水素プラズマのグロー放電を用いる方法などが知られているが、核融合プラズマの研究では、単層の吸着膜の存在も許されず、容器壁をフレッシュ表面にすることが必要であるということには変わらない。

以上のような事は、様々な解析が進んで、輻射障壁を突破することの重要性が、認識されるようになったからいえることで、アルシモビッチが T-3 の実験を行っている時にはその知識はなかったと思われる。それでも、1 年余りの間、大気開放を行わないまま、閉じ込めの悪い低温プラズマの放電を続けたことは驚くべきことである。何故それが可能であったのか興味の有るところである。

2-3. Tokamak 方式による磁場閉じ込め核融合の進展

いずれにせよ、T-3 の結果は、世界における核融合研究のエポックメイキングとなった重要な成果で、これ以降、世界の核融合研究は大きく進展した。1960 年代の後半になると多くの Tokamak 型の実験装置が世界中で建設され、 1 [keV] (~ 1 千万度) 以上のプラズマを数百ミリ秒以上維持して、 10 [ms] 程度のエネルギー閉じ込め時間を得ることが、それ程困難ではなくなった。

1980 年代に入ると、トーラスの小半径が 1 [m] を超えるような大型の Tokamak が、日本、ユーラトム (EU)、米国、ソ連で建設された。ちなみに日本の原子力研究所で整備された大型 Tokamak は JT-60 と命名されたが、この 60 は、プラズマ生成領域の体積が、 $60\text{ [m}^3\text{]}$ という、従来にはなかった巨大な装置であることに由来している。

その後、これらの大型装置などで、1 億度を超える超高温プラズマの閉じ込め、 $10^{20}\text{ [m}^{-3}\text{]}$ を超えるプラズマ密度、1 秒に近いエネルギー閉じ込め時間、30 秒間ほどのプラズマ維持など、核融合燃焼反応に必要な条件に近い値が個別に実現しているが、今のところ一つの装置での同時達成はできていない。

3. 産総研における磁場閉じ込め核融合の研究の歴史、黎明期と高速ピンチを用いた研究

産総研 における磁場閉じ込めによる核融合研究は、産総研に統合される前の電総研の、さらにもう一つ前の電気試験所で開始された。世界の大勢に遅れることなく 1950 年代の終わりごろに、ZETA 型の装置を建設して実験を行った写真が残されているが、装置の規模や

実験結果については良く分からない。本家の ZETA がうまく行かなかったので、同様の結果であったのではないかと想像される。

その後、1960 年代に入って、電気試験所が持っていた高電圧・大電流の制御技術を基に、高速磁場立ち上げによるプラズマの衝撃加熱と高圧縮の実験、いわゆるシーターピンチを用いた高 β プラズマの研究が開始された[8]。シーターピンチは、プラズマを生成する円筒状の真空容器の外側に、円筒座標系の θ 方向に一周する金属板のコイルを、Z 方向に並べて、これらのコイル全体にマイクロ秒オーダーの立ち上がりを持った大電流を流すものである。

この電流により、円筒容器内に数キロガウス以上の Z 方向の磁場を、マイクロ秒オーダーで急速に立ち上げ、プラズマ内に衝撃波を起こしてプラズマを加熱し、さらに磁場によるプラズマの圧縮で、高温・高密度のプラズマを円筒の中心軸上に生成するものである。実験では 1 [keV]を超える高密度のプラズマを生成することに成功して、核融合反応による中性子の生成に成功した。

シーターピンチではその磁場の構造上、円筒の両端から磁力線が容器の外側に出てしまうので、磁力線に沿ったプラズマの高速な損失により、閉じ込め時間もマイクロ秒オーダーに制限される。ただし、高温・高密度を持つ圧力の高いプラズマが比較的小さい磁場強度で生成されるので、磁気圧に比べてプラズマの圧力が無視できない大きさを持つ、高 β 値のプラズマの生成が可能である。

この点を活用して、シーターピンチ装置の円筒の両端をつないでトーラス状のプラズマを作り、トロイダル磁場と、トロイダルプラズマ電流を流して作るポロイダル磁場を、マイクロ秒のスケールで急速に立ち上げて衝撃波加熱を行い、生成された高 β プラズマを閉じ込めることが試みられた。この方式をトロイダルスクリュウピンチと呼ぶ。そこでは Tokamak と同じように、強いトロイダル磁場と小さなプラズマ電流を用いて、電磁流体不安定性の発生を抑え、衝撃波加熱で生成した高 β プラズマを閉じ込める、いわば、低 β のプラズマを閉じ込めている Tokamak の、高 β 化を実現しようとしたものであった。

電総研ではこの方式を用いて高 β トーラスプラズマの生成と維持を目指す、ETL-TPE-1 装置 (Electro-Technical Laboratory Toroidal Pinch Experiment 1) を建設した。筆者はこの装置が建設中に電総研に新人として入所し、右も左も分からないまま、装置完成後はその運転に加わった[9]。その後、この装置による成果を基にして、次の大型のスクリュウピンチ装置、ETL-TPE-2 がつくば移転後に建設され、1980 年代に実験が行われた。筆者はその時は逆磁場ピンチグループに所属しており、その実験には参加していない。TPE-2 の研究成果は電総研の彙報にまとめられているので、そちらをご覧ください[10,11]。

4. 電総研の逆磁場ピンチ方式を用いた閉じ込めの研究

4-1. 逆磁場ピンチ方式の研究の始まり

1974 年に東京で開催された、国際連合の IAEA (International Atomic Energy Agency)主催の核融合の国際会議で、英国の J.B. Taylor により一つの興味ある理論が報告された。英国で最初の大型プラズマ閉じ込め装置として建設された ZETA は、激しい電磁流体不安定性の発生

のため、頭初予期していた閉じ込め状態を実現することはできなかったが、その中である特定の条件のもとでは、不安定性が抑制され磁場揺動が著しく低減される状態が現れることが観測された。それを **quiescent period, QP** と名付けた。その後、この状態を良く調べると、トロイダル磁場の向きが、プラズマの中心部と周辺部で逆転していることが分かった[12,13]。

その頃には、電磁流体不安定性の解析法が進展して、電磁流体不安定性を数値計算で調べることが可能となった。解析の結果、トロイダル磁場と内部トロイダルプラズマ電流を持つプラズマでは、内部電流がプラズマ表面に作るポロイダル磁場よりトロイダル磁場が十分強い **Tokamak** 型の磁場配位が安定であることが示された。それに加えて、プラズマ中心と周辺でトロイダル磁場の向きが反転する磁場配位にも、安定となる配位があることが明らかとなった。その配位では、小半径の中心のトロイダル磁場の大きさは、プラズマの表面でのポロイダル磁場の 1.5~2 倍程であり、プラズマ表面のトロイダル磁場は中心のトロイダル磁場の 1/10 以下で、向きが反転している。これが、**ZETA** で **QP** が現れた原因であり、大きな内部電流が存在しても、電磁流体不安定性が発生しない、**Tokamak** 配位とは違う磁場配位が存在することが明らかとなった。トロイダル磁場の向きが反転していることから、この磁場配位は逆磁場ピンチ (**Reversed Field Pinch, RFP**) 配位と呼ばれることになった[14,15]。

RFP 配位の特長は、外部のコイル (トロイダル磁場コイル) で作る必要のあるプラズマ表面のトロイダル磁場が非常に小さいことである。プラズマの閉じ込めに必要な磁場は、トロイダル磁場とポロイダル磁場の両者ともプラズマ内部の電流で作られ出される。プラズマ表面の磁場は、殆どトロイダルプラズマ電流が作るポロイダル磁場であり、磁場の利用効率を示す β 値は、電磁流体安定性の解析から、プラズマの電気抵抗がゼロの理想電磁流体計算では $\beta \sim 30\%$ 程が、抵抗を考慮した場合でも 20%以上が可能であることが示された[16]。

また、プラズマ表面のトロイダル磁場が弱く、この磁場を発生するトロイダルコイルには大きな電流を流す必要がないので、常電導のコイルを用いることができる。このことから、トロイダルコイルを上下に分割して、ポロイダルコイルとトロイダルコイルの鎖交を解除することが可能となり、装置の分解再組み立てが大幅に簡単になることが示された。

この様に核融合炉としてのメリットを持つ **RFP** であるが、**Tokamak** に比べて内部の磁場分布が複雑で、その様な複雑な磁場配位をどのように立ち上げて形成・維持して行くかが大きな問題であった。また、最終的な **RFP** 配位は電磁流体安定性に対して安定であるが、立ち上げ時には、電磁流体安定性が不安定である磁場配位を経由する必要がある、それをどう乗り越えるかも問題であった。

4-2. 高速磁場制御による逆磁場ピンチの配位形成、輻射障壁の存在

1960 年代の終わり頃から始まった、**ZETA** で見つかった逆磁場ピンチ (**Reversed Field Pinch, RFP**) 配位による **QP** 状態を再現しようという実験では、電磁流体的に不安定な配位を経由時間を数マイクロ秒という短時間で通過して、不安定性が成長する前に安定な **RFP** 配位を形成する手法、高速配位形成法が用いられた。これにより **RFP** 配位を再現性良く生成し、激しい不安定性によるプラズマの消滅を抑えて、**RFP** プラズマを維持することが可能となった。しかし、残存する磁場揺動のレベルは高く、プラズマの温度も数十 eV 程度以上には上

がらなかった[17-19]。

その後、T-3 などの Tokamak の成果から見て、RFP でも真空容器壁に付着した軽元素不純物が放電開始後に大量に放出され、RFP 配位の形成後も輻射障壁を突破できていないのではないかと考えられた。この不純物の問題の解決は、高速の配位形成を用いていた当時の RFP では、Tokamak より一層難しいものであった。

高速配位形成のためには真空容器内の磁場を急速に変化させる必要があるが、導電性の材料で作った真空容器を用いると、電磁シールドのため放電容器内でマイクロ秒オーダーの高速磁場変化を起こすことは不可能である。そのため、加熱加工の可能なパイレックスガラスや石英ガラスなどの絶縁材料を用いるが、その様な材料を用いた真空容器では 10^{-8} [Torr] 台の超高真空を達成することは大変難しい。

また、その様な絶縁容器と真空排気系の金属配管との接続部分には、バイトンゴムなどの有機物の O リングを用いた真空シールを用いることは避けられないが、有機化合物では、200 度 C を超えるような高温のベーキング排気が難しい。これらのことから、絶縁材料を用いた放電容器では、酸素吸着のないフレッシュ表面を得ることは大変に難しく、高速形成法を用いて、輻射障壁を突破するような RFP プラズマを得ることには、大きな壁があることが明らかとなった。

4-3. 磁場エネルギー最小状態への緩和、逆磁場ピンチ配位の形成の理論的根拠

そこに出てきたのが J.B. Taylor による理論である[20,21]。この理論では、無限長の円筒形状を仮定したプラズマにおいて、Z 方向の縦磁場 B_z と、プラズマ内を Z 方向に流れるプラズマ電流 I_z が作る θ 方向の磁場 B_θ が存在すると仮定する。これは現実のトーラスプラズマを、大半が無限大であるとして円筒で近似したもので、理論解析では良くもちいられる手法である。 B_z 磁場がトロイダル磁場に、 B_θ がポロイダル磁場に対応する。

理論は、円筒内の B_z の作る磁束 Φ_z (B_z の円筒断面の面積分) と I_z を、ある時間の間一定に保持すると、プラズマがどのような状態に緩和して行くかを考えるものである。もし、プラズマの電気抵抗がゼロであれば、そのままの状態が持続する。しかし、現実のプラズマは微小ではあるが抵抗率を持つので、磁力線のつなぎ変わりが起こり、磁場配位は変化する。そこで Taylor は、物理現象では最もありそうな変化として、プラズマは円筒内の Z 方向の単位長当たりのエネルギー W が、最小となる状態に緩和すると考えた。エネルギーとしては磁場エネルギーだけを考え、プラズマの持つエネルギーと電場のエネルギーは緩和過程では小さいので無視できると仮定した。 W を Z 方向の単位長当たりのエネルギーとすると、

$$W = \int B^2 / (2\mu_0) dV$$

となる。

ここで、 Φ_z と I_z が一定であるという設定から、磁力線のねじれ具合を示すヘリシティと呼ばれるものの、Z 方向の単位長当たりの大きさが保存されることが導かれる。 $\mathbf{A}$ をベクトルポテンシャルとすると、ヘリシティ K は次に示す式で定義される。

$$K = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} dV = \int \mathbf{A} \cdot \text{rot} \mathbf{A} dV$$

従って、問題は、 K が一定の条件で W が最小になる状態を求めることになり、それには変分法を持いる。ここでは詳しい計算は省略するが、解析の結果、 W が最小となる磁場分布は、 a を円筒の半径、 r を円筒の半径方向座標、 2Θ を未定係数として、

$$B_z(r) = B_0 J_0(2\Theta r/a)$$

$$B_\theta(r) = B_0 J_1(2\Theta r/a)$$

と表される。ここで、 J_0 と J_1 は 0 次と 1 次のベッセル関数である。 $\langle B_z \rangle$ を B_z の円筒断面平均とすると、 $\langle B_z \rangle = B_0 J_1(2\Theta)/\Theta$ となり、 Θ は下記のように表される。

$$\Theta = B_\theta(a)/\langle B_z \rangle$$

この Θ をピンチパラメーターと呼ぶ。また、逆転パラメーターと呼ばれる F として、

$$F = B_z(a)/\langle B_z \rangle = \Theta J_0(2\Theta)/J_1(2\Theta)$$

を定義する。

磁束は $\Phi_z = \pi a^2 \langle B_z \rangle$ であり、磁束は一定なので、 $\langle B_z \rangle$ も一定となる。そこで、プラズマ電流をゼロから増やして、 $B_\theta(a) = \mu_0 I_z / (2\pi a)$ をゼロから次第に大きくして行くと、 Θ はゼロから次第に増加し、 F は 1 から次第に減少する。 $2\Theta = \lambda_0$ となるところに到達すると、 F はゼロとなる。ここで、 λ_0 は 0 次のベッセル関数の最初のゼロ点、 $J_0(\lambda_0) = 0$ となるところで、ほぼ 2.4 である。このことは、 Θ が、ほぼ $\lambda_0/2 = 1.2$ のところで、 $F = 0$ となり、 Θ がそれ以上になると $F < 0$ となることを意味する。即ち、平均の $\langle B_z \rangle$ とプラズマ表面の $B_z(a)$ が反対方向をしている、言い換えると、中心と表面で B_z が反転している逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch, RFP) 配位が、磁気エネルギーの最小状態であることが示される。

J.B. Taylor の理論解析ではプラズマの外側容器は超電導を仮定し、しかもプラズマ表面は容器壁内面であるとして、プラズマ表面に垂直な磁場成分はゼロであるとしている。しかし、実際の実験では、プラズマ表面は容器壁から離れており、その間には真空領域が存在する。さらに、SUS の容器壁は電気抵抗が大きい、RFP では導電率の高い銅などで作ったシェルと呼ばれる金属製カバーを、真空容器の外側に密着して設け、シェル内面に流れるイメージ電流により、シェル内面に垂直な変化の速い磁場成分をゼロにして、プラズマの電磁流体安定性の向上を図っている。現実の実験装置ではシェルは必ず真空容器の外側に有るので、プラズマ表面とシェル内面との距離は、プラズマ表面と真空容器の内面からの距離よりさらに大きくなり、安定性が低下することは避けられない。

J.B. Taylor の理論では、先に示した全ての磁場配位は、任意の Θ に対してエネルギーの最小状態で安定である。しかし、現実的には、上記のプラズマ表面と安定化シェルの内面の隙間のため、プラズマの安定性が低下し、 $0 < \Theta < 1.2$ の場合には不安定になってしまう。プラズマが安定となるのは、 $B_\theta(a)$ に比べて B_z が十分に大きく、 $\langle B_z \rangle$ が $B_z(a)$ にほとんど等しくなる場合、即ち、 Θ がほぼ 0 で F がほぼ 1 となる Tokamak と、 $\langle B_z \rangle$ と $B_z(a)$ が反対方向を向き、 $\Theta > 1.2$ で $F < 0$ となる RFP だけであることが、理論的に示される[16]。

この J.B. Taylor と D.C. Robinson の理論により、RFP 配位が安定なエネルギー最小状態であり、 $\Theta = B_\theta(a)/\langle B_z \rangle$ が 1.2 以上という、弱いトロイダル磁場しかないところに大きなトロイダルプラズマ電流を流しても電磁流体的に安定で、しかも適切に外部条件を設定すれば、プラズマが自発的に緩和して行く先であることの、理論的な根拠が与えられた。

4-4. 電総研における高速逆磁場ピンチ配位形成の研究、TPE-1R による実験

この理論を受けて、1975 年ごろから、産総研の前身である電総研のプラズマ研究室の中で、逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch、RFP) の実験研究の可能性の検討が始まった。それは高 β プラズマの研究を続けるという、それまでの電総研の研究の流れを引き継ぐものであった。TPE-1 装置を用いたスクリュウピンチの実験が一段落し、スクリュウピンチの次の展開の議論が始まっていたので、TPE-1 装置が空いている時期を利用して、RFP 配位なるものがどんなものであるか作ってみようということになった。しかし、TPE-1 のパイレックスガラス製の真空容器は、スクリュウピンチ実験で活用した衝撃波加熱によるダメージが大きく、修理を試みたがうまく行かなかった。

そこで、熔融石英を用いたトーラス一体型の真空容器に取り換えることとなり、その際、トーラスの大半径を 40 [cm] から 45 [cm] へ、小半径を 5 [cm] から 10 [cm] まで一回り拡大して、プラズマの体積と表面積の比を大きくした。これは、表面から出て来る軽元素不純物の効果を抑えるためであった。改造した装置を TPE-1R と名付け、RFP の形成維持の実験を行った。電源は TPE-1 のものを流用したので、配位形成は 10 [μ s] ほどと、それまでよりは低速であるが、まだ高速配位形成の範疇に属するものであった[22]。



図 5 TPE-1R 装置 高速(10 μ s)のRFP配位形成を行うトロイダルコイル(こげ茶色)、ポロイダルコイル兼二重構造の導電性シェル(赤茶色) 大きなコイル電流を高速で立ち上げるのに必要な高電圧(40kV)に耐えるため、エポキシ樹脂でコイルを覆う

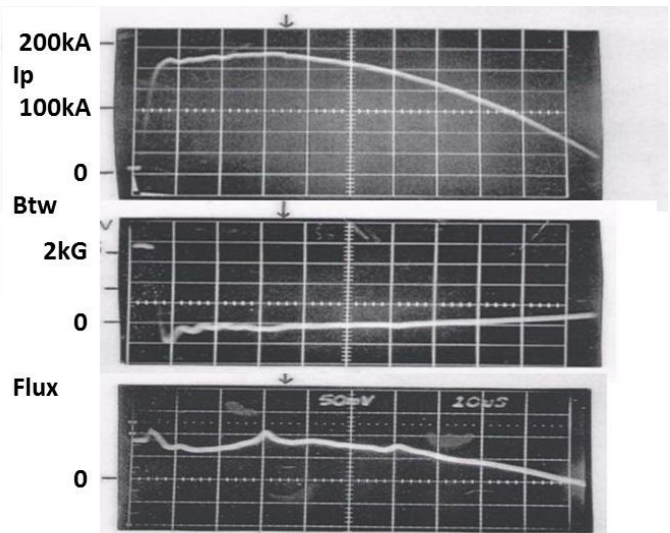


図 6 TPE-1R の RFP 放電波形 上から、プラズマ電流 I_p 、トロイダル磁場 B_{tw} 、トロイダル磁束 Flux の時間変化 横軸 10 μ s/div 10 μ s の高速 RFP 配位形成、100 μ s 程の放電持続時間 磁束に大きな変動(磁場揺動)

図 5 と 6 に、TPE-1R の装置写真と実験におけるプラズマ電流の波形を示す。実験では、10 [μ s] 以下という速いプラズマ電流の立ち上げとトロイダル磁場の逆転で RFP 配位を再現性良く生成することができ、100 [μ s] 程の比較的長い配位維持時間を達成することができた。これで、RFP 配位の形成はそれ程難しくなく、条件さえ整えれば再現性良く、全体的には安定な配位が形成されることが確かめられた。しかし、できた RFP 配位でも磁場の揺動は無視できない大きさで、得られた電子温度も 10~30 [eV] 以下と低いものであった。これは、一体型の熔融石英放電容器を使用した RFP でも、まだ軽元素の輻射障壁を突破できなかったことを意味している。

TPE-1R への改造の時点で、エネルギー最小状態への緩和現象の理論を信じて、金属放電容器を導入して低速の配位形成へと変化する選択肢があったとは思いますが、残念なことにそこまで踏み込む勇気がなかった。一つには RFP への緩和理論を信じ切ることができず、低速配位の途中で不安定性が起り、配位形成ができない可能性があると考えていたこと、さらには、それまでの RFP で放射障壁を越えられなかったのは、真空容器と排気装置に問題があり、熔融石英を用いた一体型の新しい真空容器では高真空が可能なので、放射障壁の突破の可能性があると期待したためである。未経験の新しいことには、なかなか踏み切れないものであるということを痛感している。

5. 電総研における低速逆磁場ピンチ配位形成実験の開始

最初に表 1 をご覧いただきたい。[要旨] で簡単に触れたが、これは電総研における逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch, RFP) 実験装置、その中でも筆者が設計、製作、実験にかかわった、装置を列記したものである。表は、RFP 配位の形成に 0.2 [ms] 以上のゆっくりした磁場変化による低速配位形成を用いて、軽元素不純物の輻射障壁を突破し、高電子温度を達成した TPE-1RM 装置、2 [ms] 程の磁場変化を用いた TPE-1RM15 と TPE-1RM20 装置、20 [ms] 程の磁場変化を用いた TPE-RX 装置の、研究期間とその特長をまとめたものである。

表 1 を前もって示したが、この先の、対応する装置が記述されているところから、必要に応じて、ここに戻ってご覧いただければと思っている。ただし、RFP 配位の形成に 10 [μ s] 以下の速い磁場変化による高速配位形成を用いた、TPE-1 と TPE-1R 装置、並びに筆者が研究に直接タッチしなかった別のラボの、ダイバーター配位を持つ RFP 装置 TPE-2M、低アスペクト比 RFP 装置 TPE-QS については、筆者の退職後 15 年以上経過した今となつては、表の内容に対応する詳しい資料を、見つけることができなかったのもので、この表 1 では省略させていただいた。

表 1 TPEシリーズの、装置パラメータとRFP研究における主要Topics

Machine	TPE-1RM	TPE-1RM15	TPE-1RM20	TPE-RX
R [m]	0.5	0.7	0.75	1.72
a [m]	0.09	0.135	0.192	0.45
R/a	5.56	5.11	3.91	3.82
I_p max [kA]	130	230	250	480
B_{ps} max [T]	0.29	0.34	0.26	0.21
T_e [eV]	600	1000	900	600 (PPCD 1500)
β_p	10%	10%	20%	7% (PPCD 40%)
τ_E [ms]	0.07	0.2	0.5	1
Setting up time	0.2 ms	2 ms	2ms	20ms
Duration time Max.	1 ms	12 ms	14 ms	120ms
Topics	SUS Vacuum Vessel Reduced Impurities	Slow Setting Up Equilibrium Control	Reduced Vloop, $\tau_E \sim 0.5$ ms High $\beta_p \sim 0.2$ in High Θ	Long discharge NB Injection to RFP
Limiter material	SUS	SUS, Graphite, Mo	Mo	Mo
Shell structure	Double thick Cu	Single thick Cu	Double thin Cu + Single thick Cu	Double thin Cu + Single thick Al
Shell proximity	1.2	1.18	1.08	1.08
Equilibrium control	Passive (shell)	DC vertical	DC vertical	DC vertical
Gap error field cancelling	Double thick shells	Gap cover + Pre-Program.+FB	Double thin shells + Pre-Program.+FB	Double thin shells + Pre-Program.+FB
Start Year	1980-	1985-	1992-	1998-2007

5-1. TPE-1RM 装置への転換

O リングで接続しないトーラス一体型の真空容器でも、絶縁材料を用いる限り輻射障壁が突破できないのなら、金属（通常はステンレス）製の容器を用いる必要があることが明らかとなった。0.4 [mm] 厚のステンレス製 (YUS-170、抵抗率 $86 [\mu\Omega \text{ cm}]$) のベローズを使うと、ベローズ構造によるトロイダル方向の長さの実効的倍率を 2 程度として、TPE-1R と同じほどの大きさ（大半径 45 [cm]、小半径 [10cm]）のトーラスでは、トロイダル方向の電気抵抗は $20 [\text{m}\Omega]$ 程度となる。一方、プラズマの抵抗は放電初期の $10 [\text{eV}]$ の低温状態でも $2 [\text{m}\Omega]$ 程度なので、電流立ち上げに $2 [\text{kV}]$ 程の電圧をかけても、大部分の電流はプラズマを流れることになり、金属真空容器でもプラズマ電流の立ち上げと、プラズマ表面のトロイダル磁場の逆転が可能であることを、回路の数値計算で確認した。心配なのは、配位形成の途中に不安定な配位を通過するので、その時激しい不安定性が起これば、プラズマ電流が急速に減少して放電が成長できなくなることであった。

これはやって見なければ分からないことなので、最終的な決断には賭けのようなところがあった。もっとも、これは何か新しいことを行う際には付きまとう問題で、答えが分かっているようなら、新しいことではないということもできよう。

1977 年ごろから、TPE-1R 装置を、金属製放電容器を用いる様に改造し、10 マイクロ秒オーダーではなく、100 マイクロ秒オーダーの逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch、RFP) 配位形成にチャレンジしたいと考えるようになった。問題はそのための予算をどう獲得するかであった。そのころから、次期スクリーピンチの TPE-2 装置の計画が進行し始めたので、RFP への予算配分には厳しいものが有った。その頃の事業計画や予算の獲得などについては、下端の筆者などには話は無く、今も良く分からないが、たぶん金属真空容器の製作については何とかなったが、それを組み込むための TPE-1R 装置の改造や分解組立、電源の低速化への改造などの費用までは厳しく、自分たちで努力しろということだったのではないかと、想像している。

そうこうしている内に、1980 年の電総研のつくばへの一斉移転完了の時期が近づいてきた。従って、TPE-1R を、金属真空容器を使用する装置 (TPE-1RM と名付けた) へ改造することも、その中で考えることとなった。つくば移転で言われたことは「現状移転をせよ」ということで、これを字義のまま理解すれば、今使っている装置に具合が悪いところがあっても改良しないで、そのまま移転して組み立てよという風にとらえられる。しかし、良く考えればそんなバカな話はないので、移転してそのままの再組み立てが終わった後に手直ししろということは、全くの時間と税金の無駄遣いになる。

移転時の分解と再組み立てを契機に改良するのが道理にかなっている。ただそれを言うと、その機に乗じて改良の予算を移転費に上乗せした要求が頻発し、移転費が膨れてしまうのを恐れた財務当局が、移転費だけしか出しませんよと言ったものではないかと解釈できる。従って、移転費の範囲内で改良できるか、あるいは他の予算を使ってでも改良した方が良いのなら、移転を機に行うのが理にかなっているであろう。

移転の時にここまで突き詰めて考えたわけではないが、必要に迫られていたので、TPE-1R 装置の移転を契機としてステンレス製の真空容器を用いた TPE-1RM 装置に改造し、RFP の

低速配位形成実験を行うこととなった。もし、つくば移転がなかったなら、その様なことができたかどうか分らない。仮にできたとしても、時期はかなり遅くなったのではないかとと思われる。我々にとっては、つくば移転は大変な幸運であったと思う。

図 7、8 に TPE-1RM 装置のコイル負荷系とステンレスペロー製の真空容器の写真を示す。閉じ込め磁場強度が小さくて良い RFP の特長から、非常にシンプルな装置であることがお分かり頂けると思う。

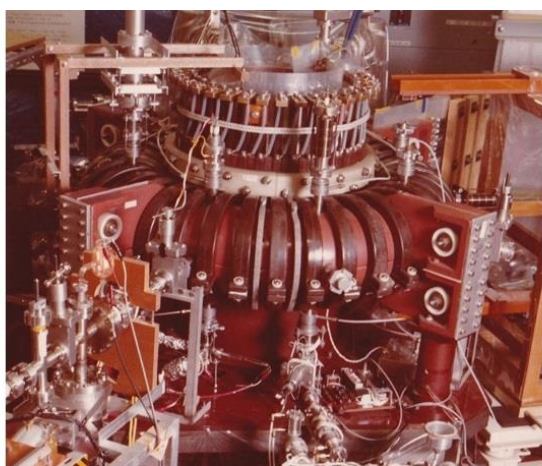


図 7 TPE-1RM装置 RFP配位の低速形成を行う
コイル負荷系はTPE-1Rと同じ。電源を低速化。
放電容器として図8に示したステンレス製のペロー容
器を使用。1.0E-8 Torrの高真空を達成。



図 8 TPE-1RM 薄肉のステンレス製の容器。運搬時の固
定用治具に収めた状態の写真。
大円方向に8分割して、0.4 mm厚のペロー部を直管で
溶接。直管部に4本のポートを設けて、真空排気や各
種の計測に使用

5-2. TPE-1RM 装置の実験。1 [ms]のプラズマ保持と 600 [eV]の温度の達成

1980 年の 3 月末までに装置負荷系の改造を含む移転が完了し、その後、金属放電容器の真空排気リークテスト、250 度ベーキングを行った後、装置負荷系に真空容器を組み込み、真空排気を行った。その後負荷系との絶縁試験などを終了した後、5 月に入って放電洗浄を開始した。ただし、数秒ごとの微弱電流の放電を行う電源までは用意することができなかったため、主電源を低電圧で運転して、3 分ごとの放電を繰り返すこととなった。

1 日に放電する時間は、勤務時間+α 程度だけだったので放電回数は十分とは言えなかったが、1 ヶ月ほど継続した 6 月に入ったある日、それまで続けていた 1 日ごとの放電洗浄を終了した後に、夜遅くまで一緒にいた先輩と相談して、プラズマ電流駆動用の主電源の試験もかねて、放電洗浄の効果を見測るため、ためしにトロイダル磁場をかけたまま反転しない状態で大きなプラズマ電流を流す放電を試みることにした。放電洗浄回数が少ないので不純物が多く、温度が低くて電気抵抗の大きなプラズマができると予想していたが、最初の放電で、200 [μs]の立ち上がりで 80 [kA]と予想していたより大きなプラズマ電流が流れた。トロイダル磁場の反転をしなかったため、大きな磁場揺動が観測されるものの、電流の減衰は予想より小さく、立ち上げ後 400 [μs]程の間に単調に減少する放電が得られた。

この結果に少し驚いて、それでは試しにと次の放電でトロイダル磁場を反転させたところ、トロイダル磁束は最初の値より減少はするものの同じ方向を保ち、表面の磁場は反転する状

態、即ち、逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、RFP）配位が形成された。反転磁場の大きさをやみくもに与えたので、この放電では不安定性が発生して、プラズマ電流がステップ状に減少したが、減少後おおよそ 500 [μ s]程大きな減衰なく電流が維持された。そこで、次の放電で反転磁場を適当な値に変えたところ、スムーズなプラズマ電流の変化を持つ RFP 配位が 200 [μ s]程の電流立ち上げで形成され、その後 RFP 配位が 550 [μ s]程持続した。この持続時間は電源の性能によって決まる値で、トロイダル周回電圧がプラズマ電流を維持するのに必要な値に保たれる時間とほぼ一致しており、必要とする周回電圧もそれまでの実験に比べてかなり低いものであった。

図 9 に TPE-1RM で、0.2 [ms]という低速のプラズマ電流立ち上げを用いて、RFP 配位を形成することに成功した放電を示す[23]。図 9 の(a) SP で示す左の列の写真は、プラズマ表面のトロイダル磁場の逆転をしない場合で（この放電を Stabilized Pinch, 略して SP と呼ぶ）、一段目の写真はプラズマ電流の変化（上側）とトロイダル周回電圧の変化（下側）を示す、二段目の写真はプラズマ電流の時間微分の変化を示す。この 2 枚の写真の時間軸は 0.1ms/div である。これらの写真から、プラズマ電流が振動しながら急速に減衰すること、即ち、SP ではプラズマが不安定であることが分かる。プラズマ表面のトロイダル磁場の变化を示す三段目の写真の（この写真だけスタート時間が 1.5 [ms]早く、時間軸は 0.5ms/div と長くなっている）、3 ディビジョン目にある少し波形が変動しているところが、プラズマ電流を立ち上げたところで、トロイダル磁場の反転が行われなかったことが示されている。

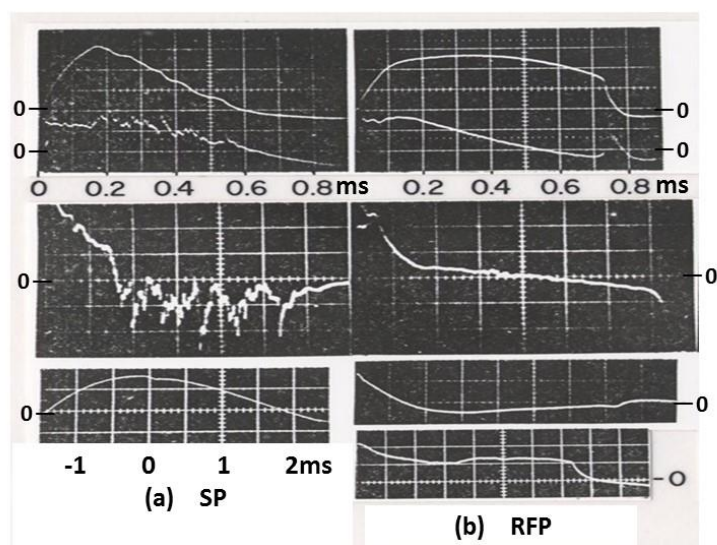


図 9 TPE-1RM 最初のRFP配位の形成 横軸 0.1ms/div
トロイダル磁場 左側 逆転せず 右側 逆転
上から プラズマ電流 I_p (32kA/div)
周回電圧 V_{loop} (200V/div 右のみ最下段
 dI_p/dt (2.3E8 A/sec/div) トロイダル磁束 (0.75mWb/div)
外部トロイダル磁場 B_{tw} (88mT/div、左のみ0.5ms/div)

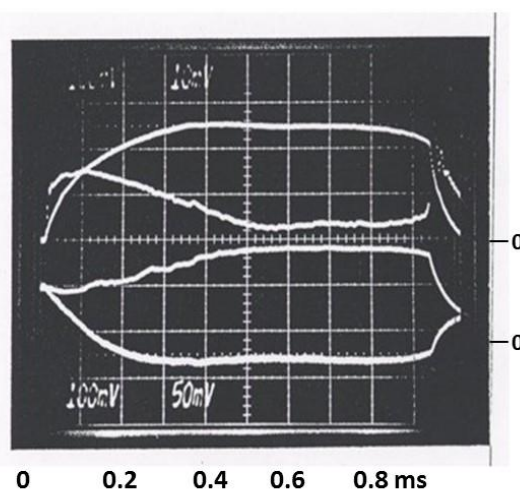


図 10 TPE-1RM 定常放電 0.4–0.9msの間
上から プラズマ電流 (32kA/div)
周回電圧 (190V/div)、
トロイダル磁束 (1.5mWb/div)
外部トロイダル磁場 (45mT/div)
横軸 0.1ms/div オシロスコープ写真

一方、9 図の (b) RFP で示す右側の列の、一段目から四段目までの写真は、磁場の低速制御を用いて、RFP 磁場配位の形成に初めて成功した場合を示している。この四段の写真の横軸は全て 0.1ms/div である。一段目の写真上側に示すプラズマ電流の立ち上げと同時に、三

段目の写真に示す外部トロイダル磁場の反転を開始し、0.15 [ms]でゼロを通過して逆転するようにした。四段目の写真はプラズマ中のトロイダル磁束の変化を示しており、外部のトロイダル磁場が逆転しても、トロイダル磁束は最初と同じ方向で、逆転していないことが分かる。これから、プラズマの中と外とでトロイダル磁場の向きが逆転していること、即ち、逆磁場ピンチ (RFP) 配位が形成されたことを示している。しかも、その後 0.5 [ms]間ほど RFP 配位が維持されていることが分かる。

重要なことは、このトロイダル磁場の逆転後は、プラズマ電流、周回電圧（一段目写真下側）、プラズマ電流の時間微分（二段目写真）、トロイダル磁束の全てで、SP において観測されていた揺動が非常に小さくなったことである。これは RFP 磁場配位が電磁流体不安定性に対して安定であることを示している。

この様に放電洗浄の効果を見るために行った放電試験で、図らずも目的としていた低速磁場制御による RFP 配位の形成に成功し、しかも当初予想していたよりもはるかに高性能のプラズマを得ることができた。正直なところあつけにとられてしまい大変驚いたことを覚えている。そして、実験結果を示す、プラズマ電流波形を撮影したオシロスコープ画面のポラロイド写真を眺めている内に、次第に興奮してきて大声で騒いでしまったことを思い出す。筆者の研究者人生でこれほど感激したことはこれ以前にも、これ以後にも無かった。誠に研究者冥利に尽きる経験をすることができたと思っている。

これ程興奮した原因の一つとして、その年 (1980 年) の秋に、国連の下部組織である IAEA (International Atomic Energy Agency) 主催の国際熱核融合研究会議が開催される予定であったことがある。その会議は 2 年に一度開催される核融合に関する世界最大の国際会議であり、そこで発表することは、その研究がその国を代表するものであり、国際的に認められたというステータスを得ることを意味していた。そのため、会議の参加には、先ず国内審査があり、それを通過した後にさらに、国際会議の審査委員会の審査を通過したものだけが発表できるという厳しいものであった。その当時は、ポスターセッションが無く、全て口頭発表だったので、会議が開かれている時間内に、全ての発表を終了する必要があり、この様な審査が行われていたのだと思う。

TPE-RM の研究も IAEA の国際会議に応募したのであるが、実験結果が出る前の、計画と建設段階の話だったので、国内審査委員会では、発表を認めることに難色を示す向きもあったと聞いているが、野心的な計画で面白いということで、強く支持して下さる委員もおられて、なんとか発表できることになった。しかし、低速磁場制御による RFP の配位形成の可能性を信じられない方も多く、その年の 3 月に開催された物理学会で TPE-1RM の計画についてグループのメンバーが発表したところ、低速配位形成に疑いを持つ先生方から、十字砲火を受け大変な目にあったことを思い出す。そんなこともあって、低速制御で RFP 配位が形成できた時には本当にうれしく、我々の目指したことは間違っていなかったと、大いに安堵した。国際会議での論文発表を支持していただいた先生方にも、グループリーダーから、低速制御で RFP の配位形成がうまくいったことを連絡することができ、おおいに安心していただくことができた。

その後、レーザー散乱法で電子温度を測定したところ、予想していた 100~200 [eV]では

なく、それまで世界の RFP では観測されていなかった、最高 600 [eV] (～600 万度 K) という高い温度となっていることが観測された。この予想外の好結果には大変驚いた。

金属放電容器を用いた低速の RFP 配位の形成は、苦節 5 年間におよぶ試行錯誤の末たどり着いた解決策ではあったが、つくば移転の好機に恵まれたことと言い、この様な高い温度が得られたことは、誠に幸運であったと思っている。本質的な問題を突破すれば、結果は後からついてくるのだということを教えられた気がする。もっとも、何が本質的な問題であるかを見つけるのは簡単でなく、日ごろの探求の積み重ねは言うまでもないが、幸運に恵まれることも重要であったと感じている。

この結果を IAEA の国際会議で発表したところ大きな反響を呼び、RFP が磁場閉じ込め核融合の手法の一つと成り得る可能性があることが、明らかになったと評価された[23,25]。ただ、金属真空容器を用いた RFP の低速配位形成については、イタリアのパドヴァ大学の研究施設で前年の終わりに成功していたということが同じ IAEA の会議で報告され[26]、我々は 2 番目と言うことになったが、得られた RFP プラズマの性能では、はるかに凌駕していたので、その点ではトップであった。我々はパドヴァの、パドヴァは我々の実験結果を会議まで知らなかった。その頃の国際間の研究情報のやり取りはのんびりしたもので、世界の核融合研究にとって余程に重大なニュースでない限り、半年から 1 年後ぐらい遅れて、情報が伝わってくることは普通であった。RFP の研究成果も、RFP の研究者の間では大いに認められたが、世界の核融合研究を震撼させる程のものではなかったということかもしれない。

なお、10 図には、最初の実験から 2 年程後に、電源を増強してプラズマ電流の立ち上げ後も、プラズマ電流を駆動できるように周回電圧をかけ続けた場合を示す。電流を立ち上げ後ほぼ 0.5 [ms]の間、ほぼ一定の電流値を保つことができ、しかもその間の揺動は、非常に小さくプラズマの安定性も保持されていることが分かる[24]。

5-3. 英国カラム研究所との共同研究、高電子温度の確認

TPE-1RM で得られた 600 [eV]という高電子温度については、余りに高温なので、欧米各国の研究者の中には、測定を間違えたのではないかと疑う向きもあった。また、逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch、RFP) でこのような高温が、トラス型の実験装置としては最小ともいえる小型の RFP 装置で得られ、しかも 500 [μ s]も高温が保たれたことは、Tokamak などの磁場閉じ込めの他の方式との比較を行う上で大変重要であり、その信憑性がシッカリしていることが必須であった。

そこで、以前ソ連の Tokamak での高温度達成を確認した前例に倣って、今回も英国のカラム研究所から計測チームを派遣して、TPE-1RM の温度を測定することになった。ハッキリ言えば、欧米諸国の研究者は、日本の TPE-1RM 研究チームの測定結果を、完全には信用していなかったということであろう。まあ 1980 年頃までは、産業技術はともかく、核融合研究のような基礎科学の研究分野では、日本は、まだまだ発展途上国であると欧米からは見なされていたのであろう。

もっとも、彼らも我々のメンツをつぶさないようには考えて、その頃、カラムで開発が進んでいた、プラズマからの 10 [keV]以下の軟 X 線の放射スペクトル計測による、電子温度測

定の開発を、高い電子温度が出ている TPE-RM を用いて共同で行いたいと申し込んできた。

英国人の国際感覚はやはりすごいものがあると思う。この共同研究は IAEA 会議の翌々年の 1981 年の終わり頃から 1982 年初めにかけて行われた。筆者は 1981 年の 9 月から、科学技術庁の原子力留学生としてカラム研究所に 1 年間滞在していたので、つたない英語を駆使して、共同研究を行うために必要な日本とのやり取りや、文章の作成などの手続きを手伝ったことを思い出す。その中でも彼らが気にしていたのは、この研究は軟 X 線の共同研究であり、日本の計測を信用していないのではないということであった。このことから筆者は、彼らが、各々の研究者のプライドを非常に重視していることを実感したものである。

本当のところは、軟 X 線の計測が上手くいったかどうか確かめるためには、トムソン散乱で電子温度を求めるといふ、その頃広く使われていた通常の手法を用いることが必要であり、それを日本と共同で行うということは、端的に言えば我々の測定を完全には信用していないということである。この共同研究を、TPE-1 RM でトムソン散乱計測を担当して、最初の高温度の測定を行った先輩がどう思われたか、その時筆者はカラム研究所に滞在していたので良く分からないが、複雑な思いはあったと思う。

共同研究の結果はこれまでの計測結果を確認するもので、600 [eV]という高電子温度が得られていることに間違いがないことが、広く認められることとなった[27]。いわばカラム研究所のお墨付きを頂いたことになる。今ではそれ程ではないと思うが、1980 年頃では、欧米の一流研究機関から認められたということの効果は大変大きく、研究者同士では言うまでもなく、行政サイドへの説明でも大いに役に立ったと聞いている。

6. TPE-1RM15 の建設と実験

この成果をもとに、TPE-1RM で研究を続け、ヘリシティーを保存しない系でも逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch、RFP) 配位への緩和現象が起こり得るといった、面白い成果をいくつか見出したが、何分 TPE-1RM は、元々高速配位形成実験を目的として設計された装置なので、低速配位形成実験では電源の運転条件に無理をするため、実験の条件設定に難しい所があるなど問題があった。特にプラズマ電流を一定に近い状態で 1 [ms]以上持続させることができないことが問題であった。

そこで、最初から 1 [ms]程度の磁場変化で低速配位形成を行い、形成された RFP 配位を 10 [ms]程の間、維持することを目的として、次期 RFP 装置 TPE-RM15 の設計・製作に取り掛かった。設計では、プラズマ持続時間の延長を妨げる最大の原因である不純物の混入を、できるだけ抑えることを目標とした。そのためには高真空の達成は言うまでもないが、プラズマの平衡位置の制御と不整磁場の低減により、容器壁とプラズマとの接触を極力抑えることに努めた。さらに、真空容器の内面に数ミリメートル出っ張るモリブデン板を、ポロイダル方向に 4 か所、トロイダル方向に 16 か所、計 64 か所設けた。これは真空容器壁の薄いステンレス製のベロー部分にプラズマが直接触れないように保護するもので、リミッターと呼ばれるが、プラズマと真空容器の接触面積を減らす役割も果たすことができる。この様にして、トロイダル周回電圧の低減を図り、閉じ込め性能の改善を目指した[28-32]。

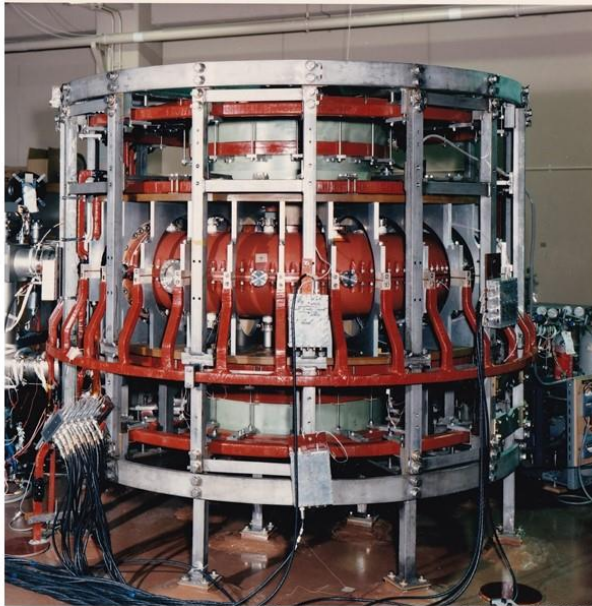


図 11 TPE-1RM15装置 低速RFP配位形成と長時間維持
コイル負荷系を新しく製作 電源を低速化
2msのプラズマ電流立ち上げと12msの放電維持

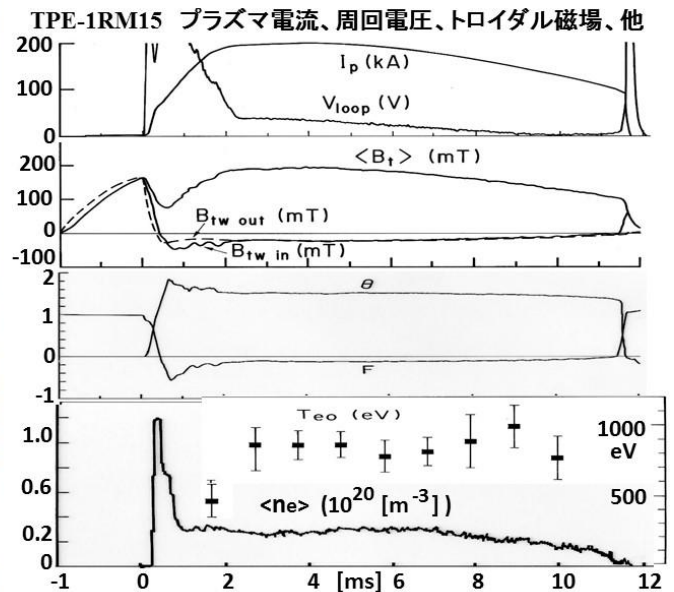


図 12 TPE-1RM15の代表的結果 時間変化は12msまで
プラズマ電流 I_p 周回電圧 V_{loop} 平均トロイダル磁場 $\langle B_t \rangle$
真空容器の外側と内側のトロイダル磁場 $B_{tw out}$ & $B_{tw in}$
 θ と F 、中心電子温度 T_{e0} 、平均電子密度 $\langle n_e \rangle$

図 11 に TPE-1RM15 の装置の写真を、図 12 にその代表的なプラズマ電流、周回電圧、プラズマ中の平均トロイダル磁場、真空容器の外側と内側のプラズマ表面のトロイダル磁場、 θ と F 、トムソン散乱による中心電子温度と、干渉計で計測した平均電子密度の時間変化を示す[28]。シェルと真空容器は TPE-1RM と同じような形状であるが、ポロイダル磁場コイルは分散型の一周コイル群から形成され、プラズマ電流の駆動に必要なトロイダル周回電圧を発生する磁束変化と、平衡に必要な垂直磁場を、同時に生成する構造となっている。トロイダル磁場コイルはアルミ板をくり抜いた、ポロイダル方向に一周する単純な構造で、コイル部分はむき出しのアルミで、FRP 製の支持円盤で絶縁をとっている。トロイダル磁場が弱くてもプラズマの安定性が保たれるという RFP の特長が良く出ている。

電源は新しく製作したコンデンサ電源で、ピーク値 200 [kA]のプラズマ電流を持つ放電が 12 [ms]程維持できる。これは TPE-1RM の 10 倍以上の長さである。800~1000 [eV]の高い電子温度と電子密度が実現し、それが 8 [ms]間ほぼ一定に維持されていることが分かる。

トーラス形状のトロイダルプラズマ電流は円環電流なので、その大半径が大きくなる方向に膨らもうとする。また、プラズマの持つ圧力も大半径を膨張させる。従って、トーラスプラズマを一定領域に閉じ込めるためには、この膨張を抑えることが必要である。そのため大円の円環に直交する向きに磁場をかける。一般に実験では（たぶん核融合炉でも）トーラスは大円の円環が水平面上にあるように設置するので、垂直方向の磁場をかけることになり、これを垂直磁場と呼ぶ。垂直磁場の向きは円環の大円の外側、即ち、大半径が大きくなる側で、トロイダルプラズマ電流の作るポロイダル磁場の向きと同じになるようにする。こうすることで、円環の外側の磁場が強くなり、円環の内側では弱くなるので、円環全体ではその大半径が小さくなる方向に力を受ける、この力と膨張しようとする力がバランスするところで、円環は一定の大半径で保持される。これがトーラスプラズマの平衡状態である。一般に、

垂直磁場はプラズマの外側に垂直磁場コイルを設けて発生する。

しかし、TPE-1RM では真空容器に密着して、高い導電率を持つ銅製のカバーで真空容器全体を覆い、プラズマ電流立ち上げ時に金属表面に発生するイメージ電流と、プラズマ電流の作る磁場との間の反発力を利用して、トーラスの平衡を維持する手法を用いた。従って、外部垂直磁場コイルは使用していない。この金属カバーは、電磁流体安定性を向上するために用いるシェルと呼ばれるものと同じもので、それをトーラスの平衡にも用いるのである。

この手法には二つの問題点がある。一つは、銅は小さいと言っても電気抵抗を持つので、イメージ電流は、時間とともに拡散・減衰して行く。従って、ミリ秒を大きく超える平衡状態の維持は不可能である。もう一つは、真空容器を完全に一体の導体シェルで覆うと、外部の磁場変化や電場が遮蔽されてしまうので、真空容器内のプラズマ電流を励起することができなくなる。この問題を解決するため、シェルをいくつかの絶縁物で分離して、大半径と小半径の各々の方向に一周する電流路を作らないようにする。しかし、このような絶縁部分を作ると、そこでイメージ電流の流れが遮断され、不必要な方向の電流路が形成されることになり、大きな不整磁場が発生して、閉じ込め磁場配位が壊れてしまう。その解決策として、TPE-1RM では内外に絶縁分離した銅製の2重の厚肉シェルを用い、トロイダル方向の電流に対する絶円箇所を90度ずつずらして、不整磁場の発生を抑える手法を用いた。その結果、1[ms]以下では問題なくRFPプラズマの維持が可能であった。

しかし、1[ms]を超え10[ms]以上のプラズマの維持時間を目指すTP-1RM15では、シェル上のイメージ電流の拡散減衰が効いてくるので、同じ手法は使えないと考え、シェルは一重として、外部のコイルで平衡に必要な垂直磁場をかけることとした。また、後で述べる様にシェルの内側に、パルス的な垂直磁場を発生するコイルや、表面を絶縁した銅製のカバーを取り付けるので、10[cm]というプラズマの半径では小さ過ぎて工作が難しく、プラズマ半径を13.5[cm]に、大半径を70[cm]に一回り大きくすることとした。

もしプラズマの平衡維持に必要とする垂直磁場と、全く同じ磁場を外部コイルで作ることができれば、平衡に関するシェルのイメージ電流は無くなり、シェルの絶縁部が作る不整磁場を考慮する必要は無い。しかし、現実にはそれは不可能なので、ある程度のイメージ電流が流れることは避けられない。そこで、シェルの絶縁部付近だけを覆う薄くて短い銅製のカバーを、シェルと真空容器の間に用い、そのカバーに流れるイメージ電流で、不整磁場の補正を行った。さらに、同じシェルの絶縁部にローカルな補正垂直磁場を発生するコイル（形状からサドルコイルと呼ぶ）を設け、シェルの絶縁部から漏れ出す磁束がゼロになるように、そのコイル電流をフィードバック制御して、10[ms]を超える時間でも不整磁場を補正できる平衡維持を試みた。

その結果は劇的で、フィードバック補正がない場合には、プラズマ電流の増加が難しく、1[ms]程度しか持続しなかったものが、補正を行うにしたがって滑らかに電流が増加することになり、電流の立ち上げ後、最長8[ms]の電流の維持が可能となった。また、フィードバックをそれ以上強くすると、逆に電流の持続時間が短くなることから、ほぼ最適の補正ができたと考えている。この実験から、不整磁場の大きさは、プラズマ表面のトロイダル磁場の $\pm 1\%$ 程度以下にすることが必要であることが分かった[28-31]。

平衡制御としては不整磁場の発生の抑制だけでなく、もう一つの課題があった。シェルのイメージ電流で平衡をとる場合には、大半径の外側のポロイダル磁場を強くする必要があるので、プラズマは大半径が大きくなる外側方向に膨らんでしまう。そのためプラズマと真空容器壁との接触部が増え、不純物の発生が増えて、閉じ込め性能が劣化する。これを防ぐにはプラズマの小半径の中心が真空容器の中心付近に来るようにしなければならない。

そのためシェル内へ垂直磁場が浸透する時間より長い数秒の持続時間を持つ垂直磁場（これを DC 垂直磁場という、本当の意味の DC ではないが通常の磁場制御時間に比べて十分長いのでそう呼んでいる）を、放電開始前にかけて、磁場が完全にシェル内に浸透してから、RFP の配位形成を開始する。こうすると配位形成後には、DC 垂直磁場の効果でプラズマの位置を変えることができる。

ただし、放電開始時に DC 垂直磁場があると、トロイダル磁場だけの場合と比べて、磁力線が上下方向に傾いて、放電容器壁を貫くようになり、放電開始時に供給される電子がトロイダル周回電圧により磁力線に沿って加速されても、すぐに上下の壁にあたって失われてしまう。そのため封入ガスの電離が進まず、放電が始まらないという問題が起こる。そこで放電初期のプラズマ電流立ち上げ時だけ、シェル内側に設けたコイルにパルス電流を流して、真空容器内の DC 垂直磁場打ち消す必要がある。装置技術的には大変であるが、DC 垂直磁場の大きさはそれほど大きくないので、その様な、パルス垂直磁場コイルと呼ばれるコイルを、シェル内面に取り付けた[29]。

TPE-1RM15 で DC 垂直磁場を用いた、平衡位置のミリメートル単位の制御実験を行ったところ、DC 垂直磁場無しの時の水平外側方向の変位が 6 [mm]であったのが、DC 垂直磁場を増やして、変位を -2 [mm]まで内側に寄せると、プラズマ電流を一定に保つために必要な周回電圧が 45 [V]から 25 [V]まで、半分近く減少することが分かった。これはエネルギー閉じ込め時間が 2 倍近く改善したことを意味しており、これほど厳しい平衡位置制御が要求されるのかと驚いたことを覚えている[28,30]。

この様な平衡位置制御と、真空容器壁の放電洗浄によるフレッシュ表面の実現で、TPE-1RM15 においては、TPE-1RM の 10 倍以上の放電持続時間 12 [ms]を達成すると共に、1 [keV]の電子温度、 $\sim 10\%$ の β 値、0.2 [ms]のエネルギー閉じ込め時間を実現した。これは TPE-1RM15 の設計・計画時の予想を十分に満足するものであった。これにより、低速の磁場制御を用いた、RFP の配位形成とその保持の手法を確立することができた[28]。

7. TPE-1RM20 への改造と実験

この様な TPE-1RM15 の成果は、ミリ秒オーダーの低速磁場制御による逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、RFP）配位の形成とその保持の手法を確立するもので、以前の高速磁場制御を用いた実験から見ると、夢のような成果であった。さらに、RFP プラズマの性能向上に伴って、高精度の不正磁場の補正や、平衡位置の精密な制御が重要であることが明らかになった。これらの RFP プラズマの閉じ込め手法の進展により、RFP プラズマの閉じ込め性能を最終的に決めるものが、トロイダル磁場がプラズマ中心と外側で逆転しているという、複雑な RFP の磁場配位を維持するために必要な、内部磁場の小さな揺動、これをダイ

ナモ効果と呼ぶが、この揺動によるプラズマの損失であることが明らかになってきた。

これらの点に対応して、RFP の閉じ込め性能の向上を図るため、TPE-1RM15 から TPE-1RM20 への改造を 1990 年に行い 1991 年より実験を開始した。改造は大規模なものではなく、ポロイダルコイルと電源、並びに真空排気装置には手を入れず、真空容器とシェル、並びにトロイダルコイルの改造を行った。真空容器はプラズマの小半径を 13.7 [cm]から 19.2 [cm]に拡大し、これに伴って大半径を 70 [cm]から 75 [cm]に拡大した。薄肉シェルはプラズマへの近接性を確保するため、0.8 [mm]と薄い銅板を加工して、真空容器の外側に絶縁シートを挟んで 2 重に密着して設けた。2 重にしたのはシェルのトロイダル方向の絶縁部を 90 度ずらすことで、絶縁部が作る不整磁場の発生を防ぐためである。この薄肉シェルとプラズマの小半径の比を 1.08 まで小さくして近接性を高め、電磁流体不安定性による速い磁場揺動の抑制を目指した。薄肉シェルの外側には厚肉シェルを設け、遅い磁場揺動の抑制と平衡位置の保持、並びに外部からの不整磁場の侵入を防止した。また、TPE-1RM15 と同様にプラズマの位置制御を行うための DC 垂直磁場と、放電開始時にシェル内の DC 垂直磁場を一時的に打ち消すパルス垂直磁場コイルをシェルの内側に設けた[29]。

図 13 に TPE-1RM20 装置の全体写真を示す。装置全体の架台とポロイダル磁場コイル群は TPE-1RM15 で使用したのを使い、トロイダル磁場コイル、真空容器、銅製シェルを、プラズマの大半径を 70 [cm]から 75 [cm]に、小半径を 13.5 [cm]から 19.2cm に大きくしたことに対応して作り直した。また水平の不整磁場を補正する水平磁場コイルを装置の上端と下端に設けた（架台の上下両端の黒いケーブルコイル）。

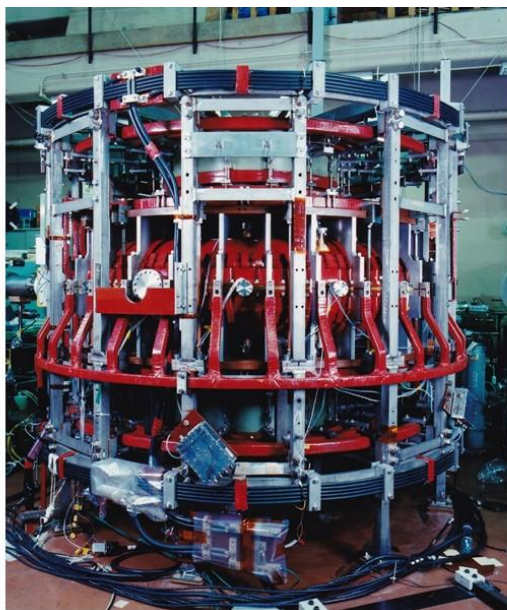


図 13 TPE-1RM20装置 低速RFP配位形成と長時間維持
放電容器と導電性シェルを新しく製作
2msのプラズマ電流立ち上げと14msの維持

TPE-1RM20 Improved High Theta Mode (IHTM)
 $\Theta \sim 2$ で $\beta \sim 20\%$

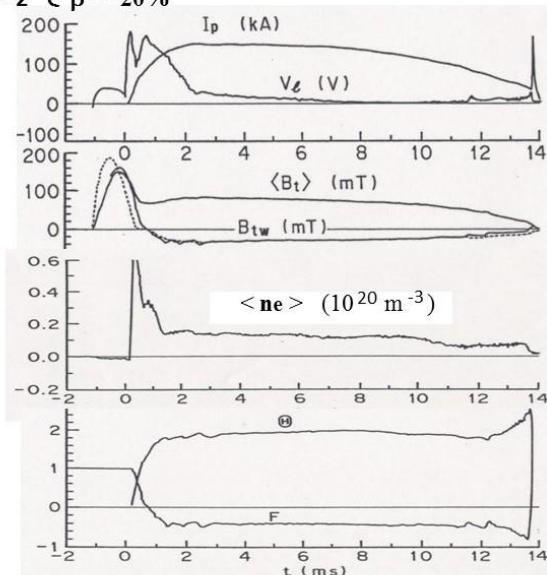


図 14 TPE-1RM20の 高 β 放電 高 Θ 閉じ込め改善モード
プラズマ電流 I_p 、周回電圧 V_l 、平均トロイダル磁場 $\langle B_t \rangle$
トロイダル磁場 B_{tw} 、平均電子密度 $\langle n_e \rangle$ 、 Θ と F 14msまで

図 14 には、高い Θ 値 ~ 2 で、高い β 値 ~ 0.2 を実現した放電波形を示す。これを Improved High Theta Mode (IHTM)と名付けた。図 14 のグラフは上から、ピーク値が 160 [kA]のプラズマ電流 I_p と周回電圧 V_l の変化で、持続時間は 14 [ms]である。その下に、平均トロイダル磁

場 $\langle B_t \rangle$ とプラズマ表面のトロイダル磁場 B_{tw} 、その下に平均電子密度 $\langle n_e \rangle$ 、さらに下に Θ と F の変化を示す。 I_p 、 $\langle B_t \rangle$ 、 B_{tw} が緩やかに減衰し、 $\langle n_e \rangle$ 、 Θ 、 F が 2 [ms]から 10 [ms]の間、ほぼ一定に維持されていることが分かる[35]。

TPE-1RM20 では、1995 年までの 5 年間の実験で以下の成果を得た。TPE-1RM15 と同じ電源を使ったので、プラズマの維持時間は最大 14 [ms]、プラズマ電流の大きさは 100 [kA]から 250 [kA]と TPE-1RM15 と大きな違いはなく、中心電子温度も、同じ 160 [kA]のプラズマ電流の時と比較すると、700–800 [eV]と違いはなかった。しかし、電子密度は TPE-1RM15 の $2.5 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ から TPE-1RM20 の $1.2 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ と半分になった。これは、プラズマの体積と表面積の比が半分近くになったため、表面を通しての粒子の補給が半分に下がったのが原因であると考えられる。これによりプラズマの圧力は半分になった。

一方、TPE-1RM20 は半径が大きくなったため、同じプラズマ電流ではプラズマ表面のポロイダル磁場は、 $13.5/19.2 = 0.7$ 倍だけ TPE-1RM15 より小さくなり、磁気圧は半分になった。従って、プラズマの圧力のポロイダル磁場の磁気圧に対する比 β_p は、ほぼ 10%と大きな変化はなかった。大きな変化のあったのはプラズマ電流を維持するために必要なトロイダル方向の周回電圧で、30 [V]から 15 [V]へと半減した。プラズマ電流が同じなので、このことはプラズマへの入力パワーが半分になったことを意味する。

一方、プラズマ全体が持つ内部エネルギーは、プラズマの温度と粒子密度の積に、プラズマの体積を掛けたもので与えられるので、TPE-1RM15 と比べると、TPE-1RM20 では温度が同じで密度が半分、体積は倍となることから、両者で同じ値となる。従って、それを維持するための入力パワーが半分になったことは、エネルギーの閉じ込め時間が、0.2 [ms]から 0.4 [ms]へと 2 倍になったことを意味する。この様に、同じプラズマ電流値の時、エネルギー閉じ込め時間が 2 倍になったことは、TPE-1RM20 で、何らかの要因による閉じ込め性能の向上があること、即ち、実効的な熱エネルギーの拡散の減少があることを示唆している。

TPE-1RM20 では薄肉シェルのプラズマに近づけたことにより、プラズマ表面の磁場揺動は、1-2 [kHz]の低周波揺動ではおよそ一桁、数十 [kHz]の高周波揺動ではおよそ 1/2 程に減少し、この磁場揺動の減少が閉じ込め性能の向上に寄与したのではないかと考えられる[33]。このことは、次に示すように、プラズマ電流を緩やかに減衰させて磁場揺動を減少させる実験でも確かめられた。

電磁流体力学の理論解析から、RFP ではプラズマ表面のポロイダル磁場 $B_0(a)$ を、プラズマ中のトロイダル磁場の平均値 $\langle B_t \rangle$ で割った、 Θ 値と呼ばれる値 ($\Theta = B_0(a)/\langle B_t \rangle$) が、電磁流体安定性に大きな影響を与え、高い Θ 値を持つ配位では大きな β 値を安定に保持できることが示されている。しかし、実験では 1.7 以上の高い Θ 値を持つ RFP 配位を保持しようとすると、ディスクリートダイナモと呼ばれる数 ms 程度の間隔を持つ大きな磁場揺動が発生して、大きなプラズマの損失を生じ、良好なプラズマ閉じ込めを実現することができなかった。

$\langle B_t \rangle$ を小さくして Θ 値を大きくするためには、プラズマ表面のトロイダル磁場の逆転を深くする必要があるが、そうするとプラズマ中のトロイダル磁場の勾配が大きくなって、中心トロイダル磁場を支えるプラズマ中のポロイダル電流が大きくなる。このポロイダル電流

を維持しているのは、微小なプラズマの運動と磁場揺動の相乗作用によるポロイダル方向の実効的な電場の発生である。これをダイナモ効果と呼ぶが、この効果に必要なプラズマの揺動は、ポロイダル電流が大きくなれば、当然のことながら増大する。その増大がディスクリートダイナモの発生を引き起こしているのではないかと考えられる。

そこで、トロイダル磁束の減少に合わせて、トロイダルプラズマ電流と逆転磁場の深さを低減して、ポロイダル電流の増加を防ぎ、ダイナモ効果に必要なプラズマの揺動を抑えることを試みた。こうすることにより、少ないダイナモ効果で、RFP の磁場配位の相似的な空間分布を不変に保つことが可能となり、ディスクリートダイナモの発生を回避することができるのではないかと考えた。

ただし、トロイダル磁束の減衰が速いと、対応するプラズマ電流の減衰も速くする必要があり、十分な閉じ込め実験はできない。しかし、TPE-1RM20 では電子温度が 1 [keV]に近い高温度に保持されているので、プラズマの電気抵抗も小さく、磁束の減衰もそれほど急速ではない。実験では、プラズマ電流、トロイダル磁束、逆転磁場が 10 [ms]を超える減衰時間でゆっくりと減衰する RFP プラズマを実現することができた。

その結果、プラズマ電流を減少させながら、8 [ms]の間 Θ をほぼ一定に保ち、ディスクリートダイナモが発生しない状態を持続することができた。プラズマのエネルギー閉じ込め時間は 1 [ms]以下なので、このオペレーションにより、ショットごとに Θ を変えて閉じ込め時間の変化を見ることが可能となった。その結果、 $\Theta \sim 2$ の時に理論的な限界に近い $\beta_p \sim 0.2$ を実現して、これまでの最長の 0.5 [ms]のエネルギー閉じ込め時間を得ることができた。このことから、図 14 示す様に、ダイナモ効果による磁場揺動を抑制すれば、閉じ込め性能が向上することを実験的に示すことができた[34-36]。

TPE-RM20 の実験で大きく改善されたのは、計測系、特にデータ収集・処理装置の拡充であった。TPE-1R と TPE-1RM の実験を行った 45 年程昔には、オシロスコープ 4 台をデュアルビームで使用して、一瞬オシロの画面に現れる 8 チャンネルの単発波形を、4 台のポラロイド写真機で写していた。ポラロイド写真は即座に現像できるので、定着したものを画像写真としてアルバムに張り付けていた。これに加えて、ようやく使用が始まった大変高価な ADC が 8 チャンネルあったので、両方で 16 チャンネルのデータをとることはできた。オシロのデータの数値が必要な時には、写真の波形を読み取ることが必要であり、結構な手間と時間を要した。また、経費の点でも、高速で高感度のポラロイドフィルムは 8 枚で千円を超える高価なもので、実験を頑張ると 1 ヶ月で 100 万円を超えることもあった。

その後、多チャンネルの ADC を導入して、ポラロイド写真を使わなくなると、電総研のポラロイドフィルムの使用量が突然に激減し、フィルム販売会社の方がどうしてだと調査に来たことを思い出す。その時、整備した ADC を見せて、これからはオシロの画像を写真に撮る必要は無くなったので、もうポラロイドフィルムは必要ありません。同じことは日本中で起こるであろうと言った時の、販売会社の方の落胆の様子を思い出す。その後、デジタルカメラの普及により、ポラロイドだけでなく写真フィルム全体が壊滅してしまい、特殊な用途のものだけが残っている状態である。今では、そのデジタルカメラもスマホに押されて凋落しており、変化の速さに驚くばかりである。

1985 年を過ぎるとデータ収集・処理のコンピューター化が急速に進み出し、多数の高速 ADC チャンネルとミニコンピュータを備えるようになった。TPE-1RM15 でもその当時に標準的であった CAMAC システムを導入して順次拡充を進め、1990 年の TPE-1RM20 の実験が始まる頃には多数のチャンネルを必要とする、磁場揺動のトロイダル・ポロイダル方向の変化、プラズマ発光の分布、軟 X 線放射の分布計測など、多くの実験データの同時計測が可能なところまで充実することができた[37]。新しい実験装置を建設する時、装置の高性能化に拘って予算を掛け過ぎ、計測装置への投資にしわ寄せが行きがちであるが、面白い実験結果を得ても、計測が整わないと説得力のある成果の発表ができないということを、実感させられた次第である。

TPE-1RM20 の実験では設計時に予測した値を達成し、さらにいくつかの物理的に面白い現象を見つけ出すという、RFP の研究では世界に引けを取らない成果を上げることができたと考えている。この成果により日本は世界の RFP の研究のトップグループの一員となることができた。

8. TPE-RX 装置による逆磁場ピンチの研究

8-1. TPE-RX の狙いとその設計

上記のように TPE-1RM から TPE-1RM20 までの研究は順調に進んできたので、次の装置をどのようなものにするのかを考えることが必要になってきた。1980 年代の終わり頃から次世代の大型逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、RFP）実験装置の有るべき姿について設計研究を開始したが、その結果は、次世代の装置はどうも我々の扱えるようなスケールを超えているとの印象を与えるものであった。1990 年代に入ると世界では、プラズマの小半径が 0.5 [m]程の大型 RFP 装置として、イタリアの RFX 研究開発機構の RFX 装置[38]、米国ウィスコンシン大学の MST 装置[39]が建設されて実験が始まり、また、それらより小型の、スウェーデンの EXTRAP-T2 装置や、京都工芸繊維大学の STE 装置も稼働を始め、色々面白い研究成果が出始めた。我々としては、このままでは取り残されてしまうのではないかと心配する事態であった。しかし、RFX は、それまで RFP の研究施設が所属していた電離ガス研究所を分離して、100 人を超える人員を持つ新しい研究機構を作り、100 億円以上の予算を使って大型の RFP の実験装置を整備するもので、我々の及ぶところではなかった。また、MST の指導者はウィスコンシン大学の教授であったが、後に米国の核融合研究の中心であるプリンストン大学の核融合研究部門のディレクターに抜擢されるほどの重鎮であった。

従って、電総研が世界の RFP 研究のトップグループの一員に留まるためには、彼らに匹敵するスケールの装置を持つか、何か新しいコンセプトを持つ RFP の研究にトライして、その成果を示すことが必要であった。

ここに来て、研究で世界のトップグループに居るということの意味、その大変さを実感することとなった。お手本が無くなったのである。どのような方向に研究を進めるべきかという目標を、多様な情報を集め、それを総合して評価を行い、自分達で判断して決めることが必要となった。しかもその目標に達する方法を間違ってしまう、目標に到達できないという

可能性だけでなく、その目標自体が間違っていて、目標が達達成されたとしても無意味であるという可能性が存在することも考えられた。

今となっては色々と考えられるが、その当時はどうすべきか本当に考えあぐねてしまった。そうしている内に、2年ごとに開催される IAEA 主催の熱核融合研究の国際会議が 1990 年秋にワシントンで開催され、そのついでにウィスコンシン大学を訪問して MST 装置の見学をすることができた。そこで、そんなに広くない装置スペース、簡単な構造の装置、我々とそんなに変わらない研究スタッフ数を見て感銘を受けた。これぐらいの規模と予算なら、及ばずながら、我々でもなんとかするという可能性を感じ、もう一度、次期装置の設計研究を考え直してみようと勇気づけられた。

今となってみれば、身の程をわきまえず頑張りすぎたのかとも思わないでもないが、それまで世界の RFP 研究のトップグループの一員として認められ、誇りを持って研究を行ってきたことを考えると、世界の二大 RFP 装置に匹敵する装置を建設して、世界三大 RFP の一員となるのが可能ならば、そこで前に進むことをあきらめることはできなかったと思う。もっとも、その時点ではそんなに深くは考えず、大型 RFP 装置の建設が可能なら、そうすることが自然な流れでしょう、というぐらいの気持ちだったような気がする。

まずは、次期装置の名前を TPE-RX と名付け、装置の製作費を低減するためにはどうすれば良いかを考えた。そのためには、できるだけ TPE-1RM20 の設備を流用することが必要であると考え、磁場発生用の電源部分については、大きな増強をしないで TPE-1RM20 の 2 倍、500 [kA] のプラズマ電流を実現できる方法を考えた。ただし、プラズマ電流を駆動するコイル系としては、将来の 1 [MA] までのプラズマ電流増加が可能であるように、電流容量と電磁力対策に余裕を持たせることとした。

プラズマ電流を流す手法としては、リング状のトーラスプラズマを 2 次コイルと考え、その外側に一次コイルとなる巻線を設けて、電磁誘導の原理でプラズマにトロイダル方向の周回電圧を掛ける方法が用いられる。これまでの実験では、一次コイル系による不整磁場の発生を抑えるため、一次コイル系を構成するトロイダルリング状のコイルを、トーラスの中心軸に対して同心円状の上下対称に配置し、しかも、プラズマが生成される真空容器内の領域では、それらのコイル群が発生する磁場が必要最小限となる様に配置を決めていた。

しかし、この様な空芯コイル系では漏れ磁束が大きくなるので、2 次コイルとなるプラズマ電流と、一次コイルのカップリングを高くとるのが難しく、プラズマ電流を流すためには、大きな一次コイル電流が必要となる。これを逃れる方法として、一次コイルと二次コイルとのカップリングに鉄芯を用いる方法がある。電力用のトランスでは積層ケイ素鋼板の鉄芯を用いて、1 に近いカップリング実現している。この手法は核融合の研究では Tokamak などでも用いられ、現在も稼働している EURATOM の大型実験装置の JET では、トロイダル方向に 8 分割した鉄芯を使用している。

ただし、鉄芯を用いると、トーラス中心部の磁束をトーラスの外側部分を通して中心部に戻す鉄芯のリターンを設ける必要があり、リターンの鉄芯がある部分とない部分で、僅かではあるが鉄芯の外に漏れる磁場が変化して、不整磁場が発生してしまう。そのためトーラスの周回方向の磁場の対称性が損なわれて、色々な問題を起こすことが知られている。

RFP でも同じことが起こるが、RFP には電磁流体安定性のために必要な、分厚い導電体でできたシェルが、近接してプラズマをカバーしているので、磁場のシェル内への浸透時間より十分に短い間では、シールド効果によりこの不整磁場はプラズマ領域には現れない。シェルの効果を評価する計算の結果、百ミリ秒を超える程度の持続時間内なら、不整磁場は何とか遮蔽できると予想された。そこで、電源の増力は最小限に止めてプラズマ電流 500 [kA] を実現するため、TPE-RX では一次コイル系として鉄芯を用いることを考えた。

さらに、鉄芯を使うとカップリングが 1 に近くなるので、一次コイルに流れるトロイダル電流の総和が、二次電流であるプラズマ電流値と殆ど同じとなる状態が持続する。従って、一次コイルの配置を適切に選んで、プラズマの平衡の維持に必要な垂直磁場を作り出すようにしておけば、その垂直磁場はプラズマ電流に殆ど比例するので、微細な平衡位置の変化によるずれを補正する、小規模な垂直磁場発生システムを追加するだけで、平衡位置に対応した正確な平衡磁場を作ることができる。また、平衡に必要な垂直磁場は外部から与えられるので、平衡に必要なシェルのイメージ電流も微小なものとなり、それがシェルの絶縁部分に作る不整磁場の補正も、局所的な小さなフィードバック補正で十分となる。

この様にトロイダル磁場コイル系をできるだけ簡略したことに続いて、トロイダル磁場系に関しても、TPE-1RM15 に倣って、磁場発生用コイルは巻線型ではなく、アルミの厚板を円形にくり抜いて上下に分割した、ワンターンコイルをトロイダル方向に多数並べて用いることとした。トロイダル磁場系の電源には 5 [kV] 以下の低い電圧しか用いないので、表面の絶縁は無しにして、FRP 製の絶縁板に固定した。RFP ではトロイダル磁場を非常に小さくできるので、このような簡単で分解組立が容易なトロイダルコイルを用いることができる。

金属シェルについては、それまで用いていた銅製は、大きくなると加工が難しく、重量も重くて組み立てが大変で、高価になるので使用を断念し、電気抵抗は大きい加工・運搬・組み立てが容易で、安価なアルミ合金製とした。今回の装置では、鉄芯を用いることにより、プラズマの平衡維持に必要となる垂直磁場が、外部の一次コイルで作られるので、シェルのイメージ電流による垂直磁場は基本的には必要としない。従って、この点からは、シェルの電気抵抗が大きいことは問題とはならない。しかし、外部で発生する不整磁場が、プラズマ生成領域に入らないように遮蔽できる時間は、電気抵抗が大きくなると短くなるので、この点は問題になる可能性がある。実際、この影響を受けて出現した可能性のある磁場揺動の変化が観測されたが、それについては後ほど触れる。

金属製シェルも表面には絶縁加工しないでアルミの地肌がむき出しである。内部の真空容器との絶縁は、真空容器表面で実施する。即ち、真空容器の外面に高耐熱性を持つ薄い絶縁テープを巻き付け、その上にグラスウールテープを巻き付けて固定する。その上に薄い銅製の近接第一層シェルの密着してかぶせ、その上にも絶縁テープとグラスウールテープを巻いて絶縁・固定する。さらにその上に、第二層の近接シェルの密着してかぶせて、第一層と同様にグラスウールテープで絶縁・固定する。この絶縁されたものの全体を、シェルとの間に絶縁緩衝材を入れて固定する方法を考えた。

この様に、装置本体と電源設備の双方に工夫を凝らして簡素化に努め、我々の予算規模で実現できる可能性があるかと期待できる装置を、想定することができる様になった。そこで、

それらのアイデアを基にして、メーカーに（TPE-1RM15 と TPE1RM20 の製作を依頼し、その後の設計研究も共同で実施してきた三菱電機株式会社）、この様な装置の製作の可能性を問い合わせた。1990 年代の初め頃だったと思う。その後何度も打ち合わせを繰り返し、お互い譲れない所と譲れるところをギリギリ詰めあって、最後にこれぐらいならお互い満足して、しかも、我々に可能な予算規模に収まると考えられるところまで詰めることができた。また、実験スタッフが限られていることから、装置の運転をできるだけ簡略化し、理想的にはワンマン運転が可能となるように全体のシステムを考えた。実際には、安全上の問題から複数人でオペレーションをしたが、装置運転の効率を上げるには、役に立ったと思っている[40-47]。

8-2. TPE-RX の建設

上記の検討を受けて、世界の大型逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、RFP）装置の一員となる、TPE-RX の製作に取り掛かることとした。装置のスケールは、プラズマトーラスの大半径が $R=172$ [cm]、小半径が $a=45$ [cm] と、RFX ($R=200$ [cm]、 $a=50$ [cm]) と MST ($R=150$ [cm]、 $a=50$ [cm]) の中間を狙った。1995 年以降には TPE-1 RM20 装置を解体撤去して、その場所に新しい TPE-RX の建設を始めた。重量が 300 トン程の鉄芯を設置するため、建物の床の耐荷重の強化など、骨の折れる工事はあったが、建設は順調に進み 1998 年の春に装置の建設を完了することができた[48]。

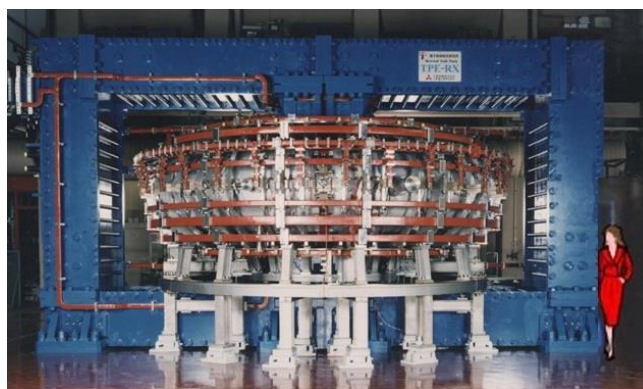


図 15 TPE-1RX装置 世界三大大型RFP装置の一つ
コイル負荷系を新しく製作 電源はTPE-1RM20を改造
30ms の低速RFP配位形成と、120ms の長時間維持

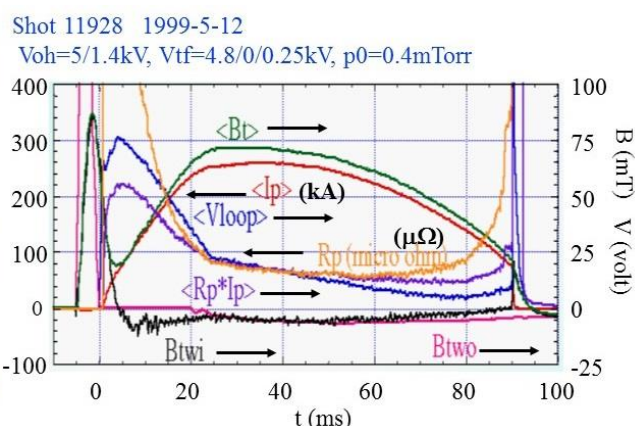


図 16 TPE-1RXの標準的放電 時間変化 100msまで
平均トロイダル磁場<B_t> プラズマ電流 I_p 周回電圧 V_loop
プラズマ抵抗 R_p プラズマ抵抗による周回電圧<R_p I_p>
真空容器の外側と内側のトロイダル磁場 B_twi と B_two

図 15 に TPE-RX 装置本体の写真を示す。コイル負荷系は全て新設したものであるが、電源は TPE-1RM20 で使用していたものを基本として、必要な手直しを加えたものを用いた。写真の青色の部分で積層ケイ素鋼板を用いた鉄心で、外形は高さ 4.4 [m]、横幅 7.89 [m]、奥行き 1.4 [m]、重量は 300 トン程である。中心鉄芯を励磁する一次巻線と DC 垂直磁場を作るポロイダル磁場コイル群は、茶色の絶縁材で電氣的絶縁を行い、ステンレス製の架台に固定している。その内側に少し見にくいだが、アルミ板製のトロイダル磁場コイルが有り、その内側にアルミ製の金属シェル、さらにシェルの内側には、外からは引き出しポートしか見えないが、ステンレスベロー製の真空容器がある。

負荷コイル系の外側の最大直径は 4.1 [m]、上下幅は 2.2 [m]程である。この様に大きな装置であるが、ご覧のとおり、シンプルで左右対称な美しい装置となっている。図 17 はステンレス 316L 製の真空容器の、装置に組み込む前の寸法チェックの際の写真で、図 18 は同様に組み立てチェック時の、アルミニウム製の導電性シェルとトロイダル磁場コイルの写真である。トロイダル磁場が弱いので、トロイダル磁場コイルが非常にシンプルで簡単な構造であることが分かる。



図 17 TPE-1RX装置の真空容器
ステンレス(SUS316L)製のベローズとストレートの一組を、
16個溶接で繋いでトーラスを作る。まだ絶縁シートを巻き
つけない、本体に組み込む前の写真

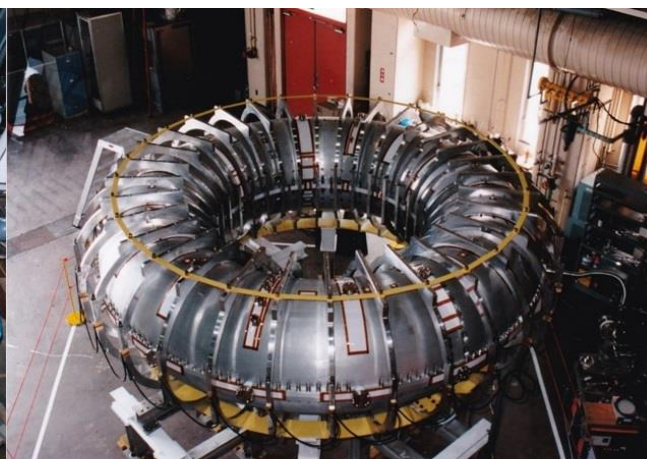


図 18 TPE-1RXのアルミニウム製のシェルとトロイダル磁場
コイル。外側表面の絶縁は必要がない
寸法チェックのための仮組み立て時の写真
非常に単純でシンプル構造であることが分かる

8-3. TPE-RX の実験とその成果

装置完成後、初期トラブルを解決しながら試運転を進め、夏過ぎには RFP プラズマの生成が可能となり、実験を開始した。図 16 に標準的な TPE-RX の放電波形を示す。上から、平均トロイダル磁場 $\langle B_t \rangle$ [mT]、プラズマ電流 I_p [kA] (ピーク値は 260 [kA])、周回電圧 V_{loop} [V]、一周プラズマ電気抵抗 R_p [$\mu\Omega$]、プラズマの電気抵抗による周回電圧 $\langle R_p I_p \rangle$ [V]、プラズマ表面のトロイダル磁場 B_{twi} [mT]、真空容器外側のトロイダル磁場 B_{two} [mT] の波形で、90 [ms] のパルスである。 I_p と R_p は左の縦軸の値、それ以外は右の縦軸の値である。

最初の実験の結果を、その年の秋に横浜で開催された IAEA の国際熱核融合研究会議で発表することができた[49]。新しい大型の核融合実験装置の建設は、国際的にも注目を集め、会議の終わりに行われるまとめの講演でも、大型の RFP 装置が日本に新たに完成したということが、TPE-RX の写真の OHP とともに紹介され、今後の成果が期待されると述べられた。この発言に大変感激するとともに、期待に背かないように頑張らなければと肝に命じたことを思い出す。

実験は順調に進み、最大プラズマ電流は 450 [kA]、放電持続時間は最長 120 [ms]と、予定の 500 [kA]と 100[ms]にほぼ達した。プラズマ電流が 350 [kA]の時の中心電子温度は 400～600[eV]、イオン温度は 300 [eV]と満足できる値であったが、平均電子密度が 6×10^{18} [m^{-3}]と予定より小さく、その結果 β_p は 0.07 と予定の 0.1 の 70%となった。また、トロイダル周回

電圧も予定した 10 [V]より大きく 15 [V]程になったので、エネルギー閉じ込め時間は 1 [ms]と、予定の半分となった。密度の低下は、プラズマの大型化によりプラズマ粒子の補給源であるプラズマの表面積と、プラズマの体積の比が小さくなり水素粒子の補給量が減ったためであると考えられる。この減少は水素ガスを高速電磁弁で補給することで補うことが可能であり予定していた 0.1 の β_p を達成することはできた[50,51]。

しかし、周回電圧の増加は、プラズマと真空容器壁の相互作用により壁から放出される不純物（酸素や炭素）、及び真空容器の内面を保護しているモリブデンなどの金属の混入量の増加のためと考えられ、これを防ぐことは容易ではなかった。いずれにしても、閉じ込め磁場強度が 0.11 [T]で、Tokamak やヘリカル磁場閉じ込め方式の磁場強度の 1/20～1/30 と非常に小さいことを考えれば、TPE-RX の 1 [ms]のプラズマ閉じ込め時間は、決して悪い値ではないと言える。

TPE-RX での実験成果は上記以外にも、外部のトロイダル磁場の逆転を急速に深くすることにより磁場揺動を抑え、短時間ではあるがプラズマ閉じ込め性能を大幅に高上させること（これを Pulsed Poloidal Current Drive、PPCD と呼ぶ、表 1 参照）[52-55]、強い集束性を持つ高エネルギー（25 [keV]）の中性水素粒子入射装置の製作と、その世界初の RFP への入射実験[56-59]、RFP における擬シングルヘリカル（QSH）状態への制御された移行法の開発[60, 61]、エネルギー閉じ込め時間とポロイダルベーター値の RFP のグローバルパラメーターへの依存性の導出[62]、等々の多くの成果を上げることができたが、それらをここに記述すると長くなり過ぎるので、ご興味のある方は、詳しい記述のある文献[1]をご覧ください。

8-4. TPE-RX の課題

残された大きな課題は、プラズマ電流を増加させて行くと、周回電圧が大きくなり、エネルギー閉じ込め時間が期待通りに大きくならないことをどう解決するかであった。周回電圧上昇の原因としては、プラズマ電流増加によるプラズマ・壁相互作用の増大で、不純物の流入が増加したことが考えられる。

TPE-RX では TPE-1RM20 より引き継いだ計測系をさらに増強した。特に、ADC のチャンネル数をさらに増やして、大きくなったトーラス一周のプラズマ表面の磁場揺動の変化を同時に測定できるようにした[37]。その効果は非常に大きく、プラズマ表面での磁場の揺動がどの様に変化して伝わって行くかをより精細に見ることが可能になった。

図 19 と 20 がその結果で、図 19 は TPE-RX の放電容器の外側に多数張り付けたピックアップコイルで測定した、ローカルなトロイダル磁場の時間変化から、ポロイダルモード数が $m=1$ の揺動の、トロイダル方向一周の分布の時間変化を示したものである。図 20 は TPE-1RM20 で同じ変化を同様の手法で求めたものである。図からトロイダル方向のモード数は、TPE-RX では $n=7$ 、TPE-1R20 では主なモード数がはっきりしないことが分かる。

ただし、TPE-RX に対しては、放電開始後プラズマ電流が立ち上がった直後の 20 [ms]から、放電終了の 110 [ms]までを表示している。一方、TPE-1RM20 に対しては、放電開始後プラズマ電流が立ち上がった 2 [ms]よりもかなり後の、5 [ms]から 5.5 [ms]までを切り出したものを表示している。これは、図 20 で分かるように TPE-1RM20 では揺動の回転が早く、長時

間の変化を1枚のグラフに示すと、回転の様子が分からなくなるためである。時刻を変えた解析では、プラズマ電流がフラットトップに近い間は、同様の速い回転が続いていることが観測できる。即ち、TPE-1RM20 ではプラズマの閉じ込めフェーズでは、かなり早いトロイダル方向の磁場揺動の回転が続いている。

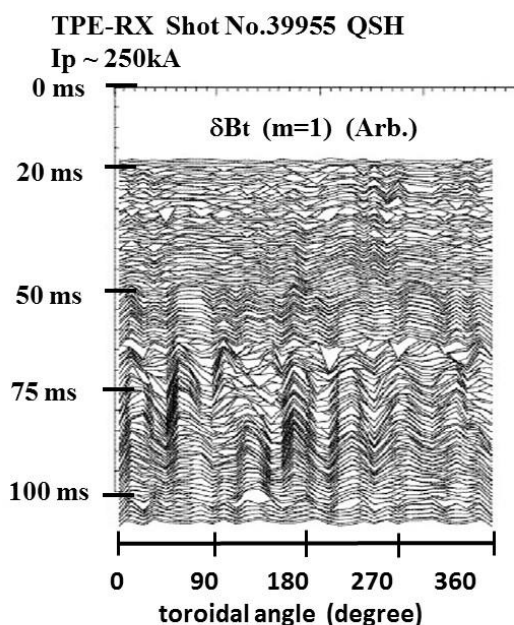


図 19 TPE-RX 磁場揺動のポロイダルモード数が $m=1$ 成分のトロイダル方向分布の時間変化。上から $t = 0$ ms、下方向に110msまで。

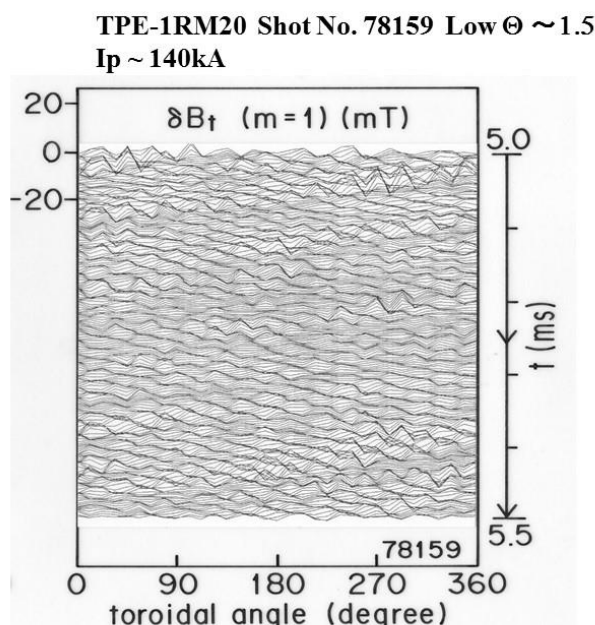


図 20 TPE-1RM20 磁場揺動のポロイダルモード数が $m=1$ 成分のトロイダル方向分布の時間変化。上から $t = 5$ ms、下方向に5.5msまで。

一方、TPE-RX では、図 19 に示されるように、プラズマ電流立ち上げ直後には多数のモードが重なって、良く分からないが、30 [ms]付近からは揺動の回転は停止していることが分かる。その後しばらくは揺動の大きさはゆっくりと成長するが、45 [ms]を超えた辺りから成長が激しくなり、さらに 65 [ms] 辺りからは、トロイダルの特定の位置に揺動が収束して(図 19 ではトロイダル角が 50 度と 170 度付近)そこで急激に大きくなってしまう。この様なトーラスの特定の位置に大きなピークを持つ磁場揺動をロックドモードと呼ぶ。プラズマ電流が 200 [kA]以下の場合にはロックドモードに至ることは多くないが、300 [kA]以上の場合には殆どロックドモードに至った。

また、ある特定のトロイダルモード数、例えば $n=7$ のモード数を持った揺動だけが急速に成長し、磁場揺動の殆どがその単一モードに集中する状態になる場合がある。この状態を疑似単一ヘリカルモード状態、Quasi-Single Helical (QSH) 状態と称する[63,64]。QSH 状態でも揺動が大きくなると、トーラスの局所的な場所に振幅が大きくなるところが現れる。

ロックドモードや QSH により、磁場揺動がトーラスの局所的な一部の場所で大きくなると、そこでプラズマと放電容器壁表面(あるいはモリブデンリミッター表面)との相互作用が増え、加熱された表面からの金属不純物のプラズマへの混入が大きくなる。これにより不純物の放射損失やプラズマの電気抵抗が増加して、プラズマの閉じ込め能力を劣化させる。300 [kA]以上のプラズマ電流で、周回電圧が上昇し、エネルギー閉じ込め時間の増加が期待通りにならないのは、これが原因であると考えられる[65,66]。

そこで、何故 TPE-RX ではプラズマ電流の立ち上げ後から揺動の回転が抑えられ、それからしばらくしてロックドモード（ある場合には QSH モード）が発生するのか、その原因を考えてみた。TPE-RX の TPE-1 RM20 との大きな違いは、鉄芯を使用していること、プラズマの持続時間が 10 [ms] から 100 [ms] へ 10 倍長くなっていること、厚肉シェルに電気抵抗の大きなアルミ合金を用いていること（TPE-1RM20 は銅製）である。

TPE-RX に使用している鉄芯は、図 15 の写真で示す様に、装置全体を一番外で取り囲んでいる青色の大きな四角の部分であり、装置のトロイダル方向の回転対称性を損なうものである。トーラスの外側の鉄心の巻き戻しは、トーラスの中心部を通る磁束を一周してもとに戻すために必要であるが、構造上どうしてもトーラスの一部分に局所的に設けざるを得ない。

TPE-RX では、図の様に鉄芯の巻き戻しの垂直部分を、トロイダル方向に 180 度違った位置に、2ヶ所設けている。従って、鉄芯からの漏れ磁場はトロイダル方向の位置により変化することになる。装置がその赤道面に対して完全に上下対称であれば、赤道面上にはこの漏れ磁場による水平方向の不整磁場は発生しない。しかし、現実的には完全に非対称性を無くすることは難しい。例えば、装置の上方は高い天井まで大きなものは何も無いが、下方にはすぐ下に床があるので完全には対象ではなく、それによって、装置の赤道面上に水平方向の不整磁場が発生する可能性がある。

厚肉シェルには、トロイダル方向に一周する電気回路の形成を防ぐため、シェルの赤道面上の大半径方向の外側部分に、絶縁物を挟んだカットが設けてある。トーラスの赤道面上にトロイダル方向に一樣でない水平方向の不整磁場があると、その磁場がこのカット部からシェル内に侵入してしまう。TPE-RX で放電の初期からプラズマ揺動の回転が抑制されるのは、おそらく鉄芯の作る水平不整磁場がシェルの絶縁部分からシェル内へ侵入し、プラズマにブレーキをかけて、その回転を阻止したためではないかと推測できる。TPE-1RM20 では鉄芯がないので、このようなことは起こらず、揺動の速い回転が持続したのであろう。

この水平の不整磁場の発生は、装置の設計を開始した時から想定はしていた。しかし、それまでの TPE-1RM20 の実験では、RFP プラズマの磁場揺動は高い周波数で継続しており、回転が停止するという経験はなかった。もっとも、筑波大学プラズマ研究センターの教授であった玉野輝男先生から、「TPE-RX では、トロイダル方向の回転対称性を壊す鉄芯が存在するので、外側の赤道面に絶縁カットを持つ厚肉シェルの構造では、不整な水平磁場の侵入を防ぎきれないのではないかと推測できる。対策を考えた方がよいよ」というご指摘をいただいていたが、その時はあまり深刻に受け止めず、いずれ対策を行おうと考えていた。今となって見れば、鉄芯の作る不整磁場の影響を軽視していたのであろう。

また、プラズマの持続時間が 100 [ms] と長くなったため、厚肉金属シェルのシールド効果が薄れ、40 [ms] を超えた放電の後半で、外部の不整磁場がシェル内に侵入し始めて、ロックドモードや QSH モードの局所的な成長を助長した可能性がある。TPE-RX では予算の制限から、厚肉シェルの材料として、アルミ合金を用いざるを得なかったが、アルミ合金は銅の 3 倍以上の電気抵抗を持っており、不正磁場の侵入時期が早まったことが考えられる。

これらのことから、ロックドモードを抑えて高プラズマ電流領域でのエネルギー閉じ込め性能を改善するには、磁場揺動のトロイダル方向の回転を持続させる必要があると考えた。

そこで、トロイダル方向に磁場強度の変化を持ち、その変化がトロイダル方向に回転する、プラズマ回転駆動用の磁場を導入して、磁場揺動の回転の駆動を試みた。しかし、プラズマ電流が 200 [kA] 以下では回転を駆動することができたが、残念ながら 300 [kA] 以上では効果がなかった[67,68]。

この結果から、結局のところ、磁場揺動の回転を持続させるためには先ず、回転のブレーキとなる外部からの不整磁場の侵入の防止を試みる必要があると考えられた。そこで、厚肉シェルの各所に不整磁場の侵入を打ち消す磁場発生用のコイルを設け、その各々に流れるコイル電流を適切に制御して、不整磁場の侵入をキャンセルすることを考えた。各々のコイル位置に、その場所の不整磁場の磁束を測るセンサーを設け、その信号に合わせてその場のコイル電流をフィードバック制御すれば良い。しかし、このやり方では、装置のかなりの部分の、分解・再組み立てが避けられず、また高性能のフィードバック電源が必要となるので、多額の費用を要することが分かった。そこで、シェルの赤道面外側の絶縁部だけでも、補正を試みようと考えた。しかし、いくつもの他の実験テーマの予定が入っており、不整磁場補正用のコイル取り付けのために、実験を長期間止めることが難しく、先延ばししている内に、予算や人員の削減が厳しくなり実行が難しくなってしまった。

TPE-RX の実験が終了する頃に、スウェーデンの EXTRAP-T2 装置が、厚肉シェルを取り去る改造を行った。TPE-RX と同じように真空容器のすぐ外に、薄肉の多重シェルの密着して設けて速い磁場揺動を抑え、そして、その外側にシェルの代わりに、トロイダル方向に 4 分割、トロイダル方向に 32 分割、総計 128 個のサドルコイルループを装備し、各コイルのある場所に設けたセンサーの信号を増幅して、コイルにフィードバック電流として給電することにより、各コイルを貫く磁束がゼロになるように操作した(これを能動シェル、intelligent shell、あるいは virtual shell と呼ぶ)。その結果、それまで回転が停止して、磁場揺動が急速に成長していた状態が大きく改善され、磁場揺動の回転が持続し、その成長を抑制することに成功した[69,70]。

また、イタリアの RFX 装置でも能動シェルを導入し、デジタル制御のフィードバック電源を用いるという本格的な装置の改造を行った。その結果、2 [MA] という大きなプラズマ電流値を持つ RFP の持続時間を、それまでの 100 [ms] からその 4 倍の 400 [ms] 以上まで伸ばし、さらに、閉じ込め性能の向上という大きな成果を得ることに成功した [71-75]。それには、能動シェルによる電磁流体不安定性の安定化と同時に、様々な原因で発生する不整磁場の、フィードバックによる補正が大きな効果を持ったことが示されている。

TPE-RX で、不整磁場を消去する実験をやり残したことは、今でも大変残念に思っている。

9. 産総研における磁場閉じ込め核融合研究の終結

この様に、TPE-1RM の逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch, RFP) における世界最初の 600 [eV] の高温プラズマの生成を始めとして、TPE-1RM15 における精密な平衡位置制御と不整磁場の補正による 1000 [eV] の達成、TPE-1RM20 における低い周回電圧の実現と、20% と言う高い β 値の実現、並びに薄肉シェルによる電磁流体不安定性の抑制、さらに、TPE-RX における 100 [ms] を超える RFP プラズマの維持と 1 [ms] のエネルギー閉じ込めの時間の達成、

等々、世界の RFP 研究において、多くの注目される成果を上げ、順調に研究を重ねてきた。しかし、21 世紀に入ると次第に冷たい風が吹き込み始めた。

先ず、最初は研究スタッフの減少であった。定年退職や、他のことで辞められた人員の補充がされなくなり十数人いた研究スタッフが次第に減って一桁になり、産総研になってからは一層加速して、最後には 3 人にまでなってしまった。

また、予算も次第に減少していった。その原因の一つは電総研（工業技術院？）の上層部の意向として、それまでの様々な経験から、大規模な装置が必要な研究は止めて行こうという考えがあったと聞いた。実は、TPE-RX を作ってしばらくしてから、電総研 OB の方々の会合がつくばで有って、その際、TPE-RX の見学に来られた元所長の方から、1990 年頃から「この次の、大型の核融合の実験装置は作らない様にしよう」と話していたのだけど...」と言われて驚いたことを思い出す。恐らく、大型の実験設備を持つ研究の行き詰まりが、色々なところで見られる状況を考えて、その様に判断されたのであろう。TPE-RX の建設は、その様な上層部の思惑に逆らうもので、逆鱗に触れたのかもしれない。

確かに、研究者の自主性を重んじようという当時の研究所の運営の仕方は、指揮命令システムが必要な大型装置を用いた研究には向いていなかった可能性は考えられる。電総研では、研究する場所があり、必要とする予算を獲得することができれば、電子技術の発展に貢献するという電総研の基本的な目的に合致するものである限り、自主的に研究を行うことが認められていたと思う。個々の研究者としては、これは大変ありがたいことであり、我々も世界でトップクラスの RFP の実験を続けているという自負もあり、お荷物になっているとは考えもしなかった。しかし、所の運営という一段高い所から見れば、心配の種の一つと成る可能性があり、先行きが気がかりであったのかもしれないと今になっては思う。

我々には、大きな実験装置を設置できる大きな実験室の独占的な使用が任せられており、予算は当時の科学技術庁が統括する原子力試験研究費より支給されていた。この予算は、元々は国立の試験・研究機関が原子力に関する研究を行うために、所属の各省庁で個別に要求していたものを、煩雑さを避けるため科学技術庁を窓口にして統括したものであると聞いている。1970 年代の初め頃までは、あまり大きな予算ではなかったが、最初の、そして第 2 次の石油危機が起こると、これからは原子力だと言うことになり、増額されていった。

そのため予算獲得の競争もあまり厳しくは無く、10 年程度の長期的な視野で、研究計画を立てることが可能であった。一般的に言って原子力に関する研究は長期間にわたるものが多く、原子力試験研究費はその様な研究に良く対応してくれるものであった。RFP の研究もその恩恵を受けて実行することが可能となり、大きな成果を上げることができた。RFP の研究は、5 年程度の期間が対象の通常の研究予算では難しかったと思う。原子力試験研究費のような、長期的展望が可能な予算に巡り合えたことは、RFP の研究を行う上で、大変な幸運であったと思っている。誠に有り難い予算であった。

原子力試験研究費の、この様な状態が続いて行けば良かったのであるが、残念ながら 2000 年の省庁の組織再編により、国立の試験・研究機関が独立行政法人化されると状況が変わってしまった。原子力試験研究費も、一般の研究予算と同様に、5 年程の短期の研究期間で成果を出すことを要請するものとなり、テーマ数の拡大とテーマごとの予算の縮小が図られる

様になったと感じた。RFP の研究は、この変化のあおりをともに受けて、2000 年以降は予算の縮小に見舞われ、最終的には 2006 年度で、RFP の研究予算は終了ということになってしまった。これが致命傷となり、筆者の定年退職と同時に、産総研における RFP による核融合研究は終了することとなった。ただし、原子力試験研究費がゼロになった訳ではなく、それまでに開発していた、高い集束性を持つ中性粒子（水素やヘリウム原子）の高エネルギービームの開発を続けることはできた。

ただ、予算がゼロになる前から色々な兆候があり、筆者も研究グループのリーダーを外されてしまった。結局のところ経済産業省が、核融合研究からは当面手を引くという決断をしたのだと筆者は感じている。産総研で長年実施されてきた慣性核融合の研究も、RFP 研究の終わる前に終了していた。筆者の憶測ではあるが、核融合の実用化はすぐには難しい、実用化ができないという可能性もあり、できるとしても数十年先になると予想して、当面の担当は、物理学の研究の支援を行う文部科学省が適当で、経済産業省傘下の産総研が手を出すには、時期が早すぎるという判断があったのだと思っている。

またこれは筆者のひがみかもしれないが、組織再編が行われるまでは電総研をはじめとする工業技術院傘下の研究所の職員も通商産業省所属の公務員であり、色々あっても最終的には通産省の内部の人間であるという意識が本省側にもあったと思う。RFP の国際協力は、OECD 傘下の IEA の内のエネルギーに関する国際協力の一つとして位置づけられ、各国の政府間の合意事項に従って運営される公的なものであった。OECD の日本側の窓口は通産省が担当しており、日、米、EU が順番に分担する RFP の国際研究集会が毎年開催されていた。3 年に一回は日本で開催されるその会合に、通産省の担当者の方が見えて挨拶されたこともあった。通産省の職員が主催する国際集会で、しかも OECD 傘下の IEA の会議ということで、支援をいただいている雰囲気があったと思う。しかし、残念ながら組織再編後は、産総研の職員といえども身内ではないという風に、変わって行ったような気がする。

[終わりに]

筆者が核融合研究に飛び込んだ 1970 年代の初め頃には、「40 年後ぐらいには核融合の実用炉ができるであろう」と偉い人から聞かされた。たぶんその方もそう思っていたのだと思う。そして、石油と天然ガスは、この後 40 年程で枯渇し始め、60 年後には世界の経済は大変なことになると言われていた。また、核分裂原子炉のウラン資源も 100 年は持たないので、その後は核融合炉が引き継ぐのであると聞かされた。

しかしそれから 50 年が過ぎたが、石油も天然ガスも、価格は桁違いにまで上昇したが、枯渇し始めたという話は聞かない。さらに 21 世紀に入ってから、シェールガスとシェールオイルの採掘が可能となり、それらの採取可能な埋蔵量は膨大で、200 年以上の供給が大丈夫ということになった。また、ウランについても海水からの吸着採取が、経済的要請を満足できる可能性があることが示され、1000 年以上の供給が可能だという話も聞いている。

一方、核融合研究は、核融合燃焼反応が実現できる ITER 装置の建設が進展し、順調に行けば 2035 年ごろには ITER 装置で核融合燃焼反応が実証できると予想されている。その後順調に行けば、熱エネルギーを炉内から取り出す準定常的な運転が可能な装置を作り、さら

にその次に、発電が可能な実用的な核融合炉の実現ということになると思われる。

筆者は将来の人類文明の維持のためには、核融合炉を実現することは必要だと考えている。逆磁場ピンチ（Reversed Field Pinch、RFP）についても、核融合炉として必要な基本パラメーターについて検討を行った[76]。しかし、シェールガスとシェールオイルという新しい化石燃料資源の開発により、実用的な核融合炉を、どうしても緊急に開発しなければならないというインセンティブは、弱くなってしまったと思う。最初の実用的な核融合炉が、21 世紀中に実現できれば大成功であろう。

こう考えると、経産省の核融合研究に対する当時の判断は妥当なものだったと思う。核融合研究にたずさわってきた者としては、誠に残念なところであるが、シェールガスとシェールオイルの出現は、全く予想外のものであったので、仕方がなかったと思っている。

時の経つのは速いもので、上記のように考えた時期から 15 年以上が過ぎ、最近では地球温暖化防止のため、化石燃料使用量の削減が強く要請されるようになっている。再生可能エネルギーが化石燃料の代わりとなることが期待されており、それが可能であるかのような言説が良く見られる。

しかし、水力、風力、太陽光発電が中心となる再生可能エネルギーの電力供給能力を評価してみると、化石燃料エネルギーを代替するのは簡単ではないことが分かる。さらに、自動車や船舶も電池で動くとした場合の、電力供給の莫大な増加まで考えると大変に難しい。

結局のところ、再生エネルギーのほとんどは太陽の直射エネルギーで、その大きさは、太陽光発電では数週間、風力では 1 年間ほど、水力でも 2~3 年間の平均値で決まる。国ごとの太陽エネルギーの受光量は、国土とその周囲の海面の面積に依存するので、日本のように、国土が狭く人口密度が高いところでは、一人あたりの太陽エネルギーの供給量は大変小さくなる。人口密度の小さな米国やスウェーデンと比べると、日本の一人あたりの太陽エネルギー量は十分の一程であり、化石燃料の半分以上を再生可能エネルギーへ置き換えることは、日本では大変難しい。たとえ供給量が何とかなっても、大きな技術的発展がない限り、そのコストは米国などの人口密度の低い国と比べて、高くなることは避けられず、日本からの輸出品の多くが価格競争力を失ってしまう可能性がある。

近未来を考えれば、残された道は原子力（核分裂原子炉）しかないということになる。本気で炭酸ガスの排出量の削減を目指すのであれば、日本では原子力の活用以外の可能性はないと言ふべきであろう。ただし、10 年以上の将来を考えれば、地震国日本では、特別な地震対策を施した、日本固有の新しい原子炉を速やかに開発することが必要不可欠だと思う。

核融合も代替エネルギー源のひとつとして見直され、研究の加速が図られようとしていると聴いている。人生を核融合研究に費やしてきた身としては、大変うれしいことである。しかし、核融合炉の実現のためには、まだいくつかの課題を解決する必要がある、それはそう簡単ではないと思う。筆者も現役を離れてだいぶ時間が経ち、最近の論文も読んでいないので、新しい研究成果については良く知らないが、ここ数年間の核融合の研究に、画期的な進歩があれば別であるが、もし、そうでなければ、課題の解決には腰を据えた長期的な取り組みが必要で、10 年単位で物事を考えなければならぬ。核融合研究の加速はそう簡単にできるものではなく、研究予算についても、10 年単位の長期的な取り組みに対応できるものが

必要であろう。

もっとも、発電炉としての経済性を考えないで良いのなら、現在までに蓄積された知識と 20 年後程に得られるであろう ITER の研究成果を合わせれば、40 年後ぐらいには、最初の核融合発電炉を作ることは、不可能ではないと思う。しかし、実社会で活用するための耐久性と経済性を得るには、更なる努力が必要で、そう簡単なことではないと予想される。

経済性を高める時に重要となるのが、プラズマ閉じ込め装置の磁場の利用効率をどう上げるか、即ち、超高温・高圧のプラズマをどれだけ小さい磁場で閉じ込めることができるかということである。ここまで述べてきた RFP 研究の主要な課題は、 β 値と呼ばれる磁場の利用効率を上げて、如何に弱い磁場で核融合を実現するかということであり、RFP では既に β 値に限れば、通常の Tokamak の実験で得られている値を大きく超える 20%という高い効率が、1000 万度という高温の状態の実現している。将来の経済的な要請を満たす核融合炉の実現に、もし我々の RFP の研究成果が貢献できるならば、これ以上の喜びはない。

地上に人工太陽を作るという壮大な夢の実現が難しいのは当然のことで、時間がかかるのは仕方がないと思う。

[謝辞]

最初に、長期にわたるこの研究をサポートしていただいた、日本原子力委員会核融合部門の諸先生方、並びに、科学技術庁、通商産業省、文部科学省、および経済産業省の方々、また多くの研究協力を通してご支援をいただいた、東京大学、日本大学、京都工芸繊維大学、核融合科学研究所をはじめとする様々な大学と研究機関の皆様方、電子技術総合研究所と産業技術総合研究所の研究支援部門の方々に深く感謝いたします。

また、電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）において、逆磁場ピンチ研究を開始され、日本における逆磁場ピンチ研究の基礎を築かれた、故小川 潔 主任研究官、および、それらの活動を外部より強力にサポートしていただいた、故吉村久光 日本大学教授に、敬意を表するとともに、深く感謝いたします。

さらに、我々が、初めて計画の頭初から低速配位形成の逆磁場ピンチとして建設を行った TPE-1RM15 装置の設計・製作、また引き続いて行った TPE-1RM20 への改造、さらに世界 3 大逆磁場ピンチ装置である TPE-RX の設計・製作の際に、発注者と製作会社といった枠を超えた、真摯あふれるご協力をいただいた、三菱核融合開発室、三菱電機、三菱重工業の方々に感謝いたします。

最後に、逆磁場ピンチ研究を実施するに当たって多くのご助力とご指導をいただいた、電子技術総合研究所、並びに産業技術総合研究所の諸先輩、および同僚の方々に感謝いたします。ここに述べた逆磁場ピンチの研究成果は、故小川 潔 主任研究官はもとより、前嶋良紀 主任研究官、島田壽男 主任研究官、八木康之 前プラズマフロンティア研究グループ長、榊田 創 前先進プラズマプロセスグループ長、小口治久 主任研究員によるところが、非常に大であったということを述べさせていただきます。

色々とお世話になり誠にありがとうございました。

[参考文献]

- [1] 平野洋一、榊田 創、小口治久、プラズマ・核融合学会誌 **87** (6), 382 (2011)
- [2] 平野洋一、プラズマ・核融合学会誌 **75**(5), 614(1999)
- [3] ITER ウェブサイト, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>
- [4] ITER ウィキペディア, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ITER>
- [5] ITER 量子科学技術研究開発機構 那珂研究所ウェブサイト、
<https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/about.html>
- [6] 核融合科学研究所ウェブサイト、 <https://www.nifs.ac.jp>
- [7] N.J. Peacock, D.C. Robinson, M.J. Forrest, et.al. Nature **224**, 488-490 (1969)
- [8] 杉崎 弓, 小林真一, 杉浦 賢, 他, 電子技術総合研究所彙報、**38** (3-5) 4 (1974)
- [9] K. Ogawa, S. Kiyama, Y. Maejima, T. Shimada, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1974 (Proc. of 5th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Tokyo 1974) **3**,445
- [10] Special Issue: Plasma Physics and Controlled Fusion Research, Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, **Vol. 50**, No.5, 6 (1986)
- [11] H. Kiyama and S. Kiyama, Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, **Vol. 64**, Special Issue No.11, 1 (2000)
- [12] E.P. Butt, H.C. Cole, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1965 (Proc. of 2nd Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Culham 1965) **2**,751
- [13] D.C. Robinson, R.E. King, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1968 (Proc. of 3rd Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Novosibirsk 1968) **1**,263
- [14] H.A.B. Bodin, A.A. Newton, Nuclear Fusion **20** 1255 (1980)
- [15] H.A.B. Bodin, A.A. Newton, Nuclear Fusion **30** (9) 1717 (1990)
- [16] D.C. Robinson, Plasma Physics **13** 439 (1971)
- [17] C.W. Gowers, D.C. Robinson, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1976 (Proc. of 6th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Berchtesgaden 1976) **1**,429
- [18] A. Buffa, S. Costa, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1976 (Proc. of 6th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Berchtesgaden 1976) **1**,447
- [19] T. Shimada, Y. Hirano, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1976 (Proc. of 6th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Berchtesgaden 1976) **1**,463
- [20] J.B. Taylor, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1974 (Proc. of 5th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Tokyo 1974) **1**, 161

- [21] J.B. Taylor, Review of Modern Physics **58** 741(1986)
- [22] T. Tamaru, K. Sugisaki, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1978 (Proc. of 7th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Innsbruck 1978) **2**, 55
- [23] Y. Hirano, Y. Maejima, T. Shimada, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1980 (Proc. of 8th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Brussels 1980) **2**, 301
- [24] Y. Hirano, Y. Kondoh, Y. Maejima, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1984 (Proc. of 10th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, London 1984) **2**, 475
- [25] Y. Hirano, T. Shimada, Y. Maejima, K. Ogawa, Nuclear Fusion, **22**(12), 1613 (1982)
- [26] A. Buffa, S. Costa, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1980 (Proc. of 8th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Brussels 1980) **2**, 275
- [27] K. Ogawa, Y. Maejima, T. Shimada, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion 1982 (Proc. of 9th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Baltimore 1982) **1**, 575
- [28] 平野洋一、「低速立ち上げ逆磁界ピンチの配位形成とその維持に関する研究」、電子技術総合研究所研究報告、951 号 (1993)
- [29] T. Shimada, Y. Hirano, Y. Yagi, et.al., Proc. of 14th Symp. on Fusion Technology, **1**, 665 (1986)
- [30] T. Shimada, Y. Hirano, Y. Yagi, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion 1986 (Proc. of 11th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Kyoto 1986) **2**, 453
- [31] T. Shimada, Y. Yagi, Y. Hirano, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion 1988 (Proc. of 12th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Nice 1988) **2**, 457
- [32] Y. Hirano, Y. Yagi, T. Shimada, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion 1990 (Proc. of 13th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Washington, D.C. 1990) **2**, 717
- [33] Y. Yagi, P.R. Brunsell, Y. Hirano, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1992 (Proc. of 14th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Wurzburg 1992) **2**, 611
- [34] Y. Yagi, P.R. Brunsell, Y. Hirano, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 (Proc. of 15th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Seville 1994) **2**, 415
- [35] Y. Hirano, Y. Maejima, T. Shimada, et.al., Fusion Energy 1996 (Proc. of 16th International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Montreal 1996) **2**, 95
- [36] Y. Hirano, Y. Maejima, T. Shimada, et.al., Nuclear Fusion, **36**, 721 (1996)

- [37] 八木康之, 矢作栄一, 平野洋一, 他、電子技術総合研究所彙報 **55**(8), 1(1991)
- [38] V. Antoni, L. Apolloni, M. Bagatin, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 (Proc. of 15th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Seville 1994) **2**, 405
- [39] S.C. Prager, A.F. Almagri, S. Assadi, et.al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1992 (Proc. of 14th International Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Wurzburg 1992) **2**, 531
- [40] Y. Yagi, T. Shimada, Y. Hirano, et.al., Proc. of 20th Symp. Fusion Technology **1**, 609(1998)
- [41] Y. Yagi, S. Sekine, H. Sakakita, et.al., Fusion Engineering and Design **45**, 409 (1999)
- [42] Y. Hirano, Y. Yagi, T. Shimada, et.al., Bull. Electro-technical Laboratory **63**(4, 5), 137 (1999)
- [43] Y. Yagi, S. Sekine, T. Shimada, et.al., Fusion Engineering and Design **45**, 421 (1999)
- [44] Y. Yagi, H. Koguchi, S. Sekine, et.al., Rev. Sci. Instrum. **74**, 1563 (2003)
- [45] Y. Yagi, H. Sakakita, S. Sekine, et.al., Fusion Engineering and Design **46**(1), 47 (1999)
- [46] H. Sago, J. Orita, H. Kaguchi, et.al., Fusion Engineering and Design **46**, 99 (1999)
- [47] H. Koguchi, Y. Yagi, H. Y. Hirano, et.al., Rev. Sci. Instrum. **74**, 1778(2003)
- [48] Y. Yagi, H. Sakakita, T. Shimada, et.al., Plasma Physics and Controlled Fusion, **41**, 255 (1998)
- [49] Y. Hirano, T. Shimada, Y. Yagi, et.al., Fusion Energy 1998 (Proc. of 17th International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Yokohama 1998) **1**, 375
- [50] Y. Yagi, T. Bolzonella, A. Canton, et.al., Fusion Energy 2000 (Proc. of 18th International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Sorrento, 2000) CD-ROM, **EX4/6**
- [51] A. Canton, Y. Hirano, P. Innocente, H. Koguchi, R. Lorenzini, Plasma Physics and Controlled Fusion, **46** (1), 23(2004)
- [52] H. Sakakita, Y. Yagi, T. Asai, et.al., Fusion Energy 2004 (Proc. of 20th International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Vilamoura 2004) CD-ROM, **EX/P2-17**
- [53] H. Koguchi, Y. Hirano, H. Sakakita, et.al., J. of Plasma Fusion Research **2**, 050 (2007)
- [54] H. Koguchi, Y. Hirano, H. Sakakita, et.al., Fusion Energy 2006 (Proc. of 21st International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Chengdu 2006) CD-ROM, **EX/P3-8**
- [55] H. Koguchi, D. Terranova, P. Innocente, et.al., Japan J. of App. Phys. **45**, L1124 (2006)
- [56] H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, H. Koguchi, Y. Yagi, Japan J. of App. Phys. **45**(10B), 8531 (2006)
- [57] H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, et.al., Fusion Energy 2006 (Proc. of 21st International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Chengdu 2006) CD-ROM, **FT/P5-2**
- [58] H. Koguchi, H. Sakakita, S. Kiyama, et.al., J. of Plasma and Fusion Research **4**(22) , 022-1(2009)
- [59] H. Koguchi, H. Sakakita, Y. Hirano, et.al., Fusion Energy 2008 (Proc. 22nd International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Geneva 2008) CD-ROM, **EX/P5-25**
- [60] Y. Hirano, R. Paccagnella, H. Koguchi, et.al., Physics of Plasmas **12** (11)112501-1 (2005)
- [61] Y. Hirano, H. Koguchi, K. Yambe, et.al., Physics of Plasmas **13**(12), 122511-1 (2006)
- [62] Y. Yagi, Y. Maejima, Y. Hirano, et.al., Nuclear Fusion **43**(12), 1787 (2003)
- [63] Y. Hirano, Y. Yagi, M. Maejima, et.al., Plasma Phys. and Controlled Fusion **A39**, A393 (1997)

- [64] P.R. Brunzell, Y Yagi, Y. Hirano, et.al., Physics of Fluids **B5**, 885 (1993)
- [65] J-A. Malmberg, P.R. Brunzell, Y. Yagi, et.al., Phys. Plasmas, **7**, 4184 (2000)
- [66] Y. Yagi, S. Sekine, H. Koguchi, et.al., J. of Nuclear Materials **290-293**,1144 (2001)
- [67] Y. Hirano, H. Koguchi, H. Sakakita, et.al., Japan J. of App. Phys. **42**(1-8), 5274 (2003)
- [68] H. Sakakita, A.M. Canton, B. E. Chapman, et.al., Fusion Energy 2002 (Proc. 19th International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Lyon 2002) CD-ROM, **EX/P2-07**
- [69] P.R. Brunzell, M. Kuldkepp, S.Menmuir, et.al., Nuclear Fusion **46**, 904 (2006)
- [70] M. Cecconello, S. Menmuir, P.R. Brunzell, et.al., Plasma Phys. and Controlled Fusion **48**, 1311 (2006)
- [71] P. Innocente, A. Alfieri, L. Carraro, et.al., Nuclear Fusion **47**, 904 (2007)
- [72] P. Innocente, A. Alfieri, L. Carraro, et.al., Fusion Energy 2006 (Proc. 21st International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Chengdu 2006) CD-ROM, **EX/P3-10**
- [73] P. Martin, et.al., Fusion Energy 2008 (Proc. 22nd International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Geneva 2008) CD-ROM, **OV/5-2**
- [74] P. Martin, et.al., Fusion Energy 2010 (Proc. of 23rd International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Daejeon 2010) CD-ROM, **OV/5-3Ra**
- [75] T. Bolzonella, et.al., Fusion Energy 2010 (Proc. of 23rd International Conf. on Fusion Energy, IAEA, Daejeon 2010) CD-ROM, **EXS/P5-01**
- [76] 平野洋一, プラズマ・核融合学会誌 **77** (8), 793 (2001)

[著者略歴]

平野 洋一 (Dr. Yoichi Hirano)

1970 年 京都大学理学部物理学学科卒

1972 年 京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修士課程修了

1991 年 京都大学工学博士

1972 年 電子技術総合研究所エネルギー部プラズマ研究室

1979 年 電子技術総合研究所エネルギー部プラズマ研究室主任研究官

1987 年 電子技術総合研究所エネルギー基礎部逆磁場ピンチラボリーダー

2001 年 産業技術総合研究所電力エネルギー研究部門

核融合プラズマグループ主任研究員

2002 年 OECD/IEA/逆磁場ピンチ国際研究協力実施協定日本代表執行委員

2004 年 産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門

核融合プラズマ研究グループ主任研究員

2005 年 産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門

プラズマフロンティアグループ長

2008 年 産業技術総合研究所定年退職
2008 年 日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所核融合研究開発部門嘱託
2009 年 日本大学理工学部物理学科教授（研究所）
2017 年 日本大学理工学部物理学科特任教授退職

受理日：令和5年4月25日