

ガラストラスから核融合炉まで：回想と展望

御手洗, 修
先進核融合・物理教育研究所(LLP) | 東海大学 | サスカチュワン大学

<https://doi.org/10.15017/1924414>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 153, pp.49-74, 2017-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

ガラストーラスから核融合炉まで ——回想と展望——

御手洗 修^{*1}

(2017 年 7 月 31 日受理)

From Glass Torus to Fusion Reactor -- Memory and Perspective --

Osamu MITARAI

E-mail of corresponding author: *osamumitarai@kyudai.jp*

Abstract

This article is my memory of the research life on a tokamak and nuclear fusion from 1974 to the present day, because I have retired at Tokai University at the end of March in 2016. I had designed and constructed the small tokamak (glass torus) in Research Institute for Applied Mechanics, which was the first Kyushu University tokamak. I made plasma discharge and conducted experiments in this device. And then I participated in TRIAM-1 project, where I have made the plasma monitor and microwave diagnostics. Based on these experiences I designed and constructed the STOR-1M tokamak in University of Saskatchewan, which was the first Canadian tokamak, and first AC tokamak in the world with a nice discharge. After shutdown of STOR-1M, I sometimes visited Canada to fix and operate the STOR-M tokamak to have a nice discharge, and conducted the AC tokamak discharge and iron core saturable operation for future fusion reactor. Also I just touch on the TRIAM-1 and TRIAM-1M tokamaks, and QUEST. In parallel with these tokamak experiments, I have conducted D-T tokamak and helical fusion reactor studies including a D-³He fusion. Based on these researches, I present the future perspective on fusion reactor.

Keywords: *glass torus, STOR-1M and STOR-M, TRIAM-1, TRIAM-1M, QUEST, fusion reactor*

1. 九州大学・トカマク 1 号機 (ガラストーラス)

1974 年九州大学大学院修士機械工学専攻に在籍中に応用力学研究所の村岡克紀教授の指導の下、小型トカマクの設計を開始した。村岡先生はイギリスのカラム研究所で乱流加熱の研究に従事し、日本に帰国したばかりであった。私は機械工学科 4 年生の時、益田光治博士のもとで、弱電離気体の高速流れの実験室で卒業研究をしていたこともあり、気鋭の村岡克紀教授の下で研究しないかと誘われ応用力学研究所に行くことにした。当時は石油ショックの頃で将来のエネルギーを夢見て核融合研究が急速にクローズアップされてきた時代背景があった。

しかしながらトカマクについて何も知らない状態であったので、村岡先生と一緒に、京都大学、深尾先生の小さなガラストーラス、ステンレスの真空容器を用いた NOVA トカマク、大阪大学の後藤先生の乱流加熱トカマク(ガラス真空管)、東大原子核、井上先生の TORIUT ガラστοカマク、名古屋大学プラズマ研究所の福田先生のガラス真空容器のシンクロマック、同じく濱田先生のステンレスの真空容器を用いた SPAC-II 等を見学して回った。シンクロマック以外はすべて鉄心のトランスフォーマを採用していた。シンクロマックではガラストーラス容器にコイルを巻き付け進行波を生成して電流を駆動するという先駆的実験を行っていた。これらの実際の装置を見学したうえで、箱崎キャンパスにある応用力学研究所の地下の角の実験室に、小型のトカマクを作るべく図面を引きはじめた。しかしながら多くの装置を見学し、図面を引きはじめると、何の経験もない修士 1 年の私にはあまりにも荷が重すぎるので、村岡先生に「ト

*1 先進核融合・物理教育研究所(LLP)
東海大学、サスカチュワン大学

カマクは難しいので、作るのはやめませんか」と弱音をはいたら、後日、矢嶋先生が作りなさいとおっしゃっていると、言われ、「そうですか、それでは作りましょう」ということになって、茨の道を歩くことになった。もしあのとき私が投げ出していたら九大の核融合実験は今頃どうなっていたであろうか？

トカマクはトロイダルコイルの中に真空容器を設置し、ガスをあらかじめ注入しておき、その中にトーラス方向の電場を誘起して、ブレイクダウン、プラズマ電流の生成を行う装置である。このときプラズマが外側にフープ力やバルーニング力で広がるので、それを抑えるために垂直磁場をかけなければいけない。また、真空容器を真空にするためにポンプで排気しなければいけない。また、計測装置も必要である。これらのシステムを作らなければプラズマ電流は生成できないというかなり大きなシステムである。

実際に設計製作した装置の主要なパラメータは主半径 $R=15.5$ cm, 小半径 $a=2.5$ cm, トロイダル磁場 $B_t < 5$ kG, プラズマ電流は $I_p=2.2$ kA であった。側面から見た図を図 1 に示す。ガラス放電管の直径は 7cm, 放電管の到達真空度は 5.7×10^{-7} Torr (1976.12.18), 鉄心の断面積は $S=\pi(4.5 \text{ cm})^2=63.6 \text{ cm}^2$, 一次巻線の巻き数は $N=40$ turns, 1cm 厚さの Al 導体シェル, ファーストプラズマは 1975 年 12 月 27 日であった。

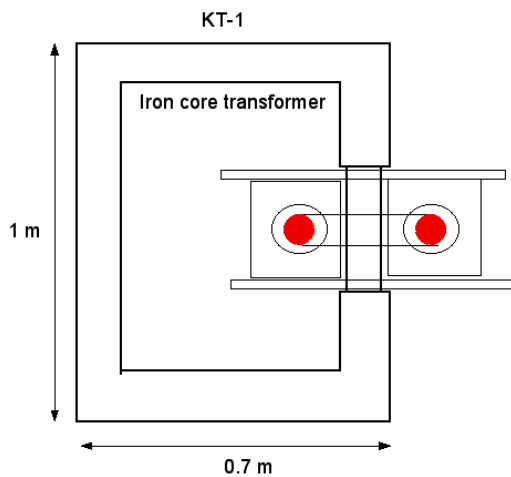


図1. 九州大学トカマク第一号機断面図

図 2 に上から見た図、横から見たトロイダルコイルの配置図を示す。当時は鉄心トカマクが主流であったし、一次側と二次側の結合が良く、電源も小さくできるので、鉄心のトランスフォーマを採用することにした。漏れ磁場を防ぐために鉄心ヨークはすべてラップジョイントとした。鉄心の材料には新日鉄のケイ素鋼板オリエンタコアハイ

ビーを用いた。(この材料は数年前に韓国のポスコに技術情報が流れたと裁判になり、新日鉄が勝訴したあの有名な磁性材料である。)この新日鉄の材料を用いて、新宮にある町工場にトランスフォーマを作ってもらった。写真を見ればわかるように、SPAC-II を真似て、トーラスプラズマの生成される中央部は円形断面にした。これはトーラス電場をきれいな円形電場にしようとするためのものであり、その上下は正形状で、通常のトランスの形状になっている。トランスは薄いケイ素鋼板を何枚も重ねるので、横から締め付ける必要がある。ここでは穴をあけてボルトを通し、両側から抑える方式を用いた。しかしボルト穴をあけると磁性特性が変わるので、焼き鈍ししてもらった。このトランスは切れ目がなく連続しているので、装置の上からトーラス状の真空容器を入れることはできない。そこで装置の架台を 2 分割にして、そこにトロイダルコイル、真空容器を置くことにした。後出の図 7 の写真を見ればわかるように 2 つの SUS 製アングルのうゑに 2 分割の架台を左右から寄せて、中央で結合している。このとき、2 つの SUS 製アングルはトランスの 2 次側のループを形成するので、電流が流れないように絶縁物をおいている。

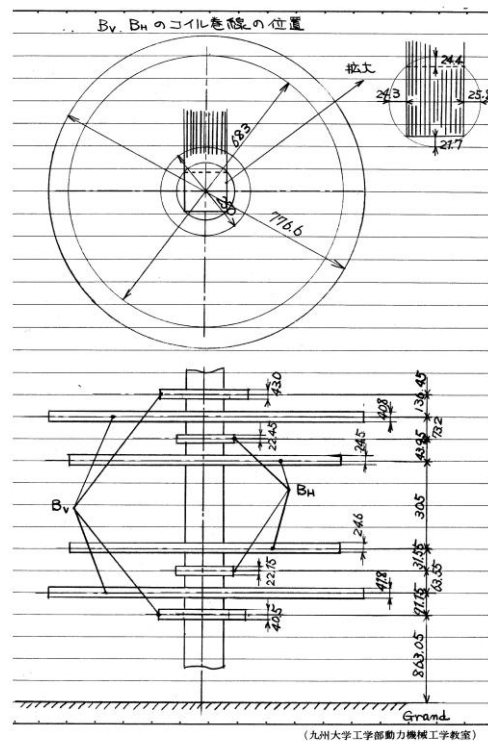


図2. 鉄心断面と PF コイル配位
(修士, 和智君による)

トロイダルコイルは 2 列の数巻きのコイルをエポキシで含浸し、鶯色の塗装をした。フィーダは上の方に設置し、全体の巻き戻しコイルをその上に設置した。ほぼ 3kG 程度のトロイダル磁場であった。

基礎的データをとるために、鉄心のヒステリシス特性を測定した。一次巻線に電流を流し、鉄心の磁束をワンターナループを用いてこれを積分して測定した。その結果をリサージュ図形としてオシロスコープに記録し、写真を撮ったのが次の図 3 のヒステリシス特性図である。この曲線は教科書に載っている図とは異なり、やや変形している。この奇妙なヒステリシス曲線を長く疑問に感じていた。鉄心を突き通したボルトがいけなかったのか、ラップジョイントがいけなかったのか悩んだ。しかしその疑問は次の STOR-1M の実験につながっていったのである。

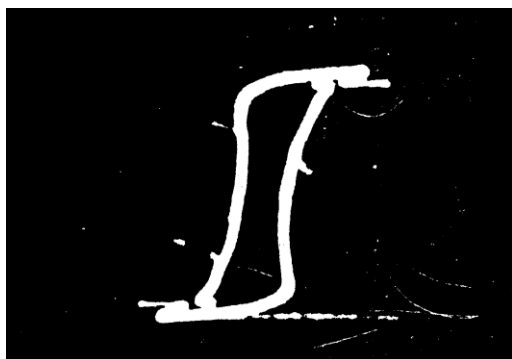


図 3. 測定したヒステリシス B-H 曲線

(2)

2. 実験装置

主半径 15.5cm, 小半径 2.5cm の小型トラス装置である。

(1) トロイダル磁場系

強磁場を得るためにコンデンサ放電を利用する。トロイダル磁場は、平形銅線をコイルにしてエポキシ樹脂でモールドしたバンケー型コイルで作られる。このバンケー型コイルを放射状に 18 個並べ、中心に磁場を作る。

このドーナツ形にまたコイルの空間に放電管、シェルが入れられる。またこのコイルを隣同士接続するための銅板により作られる。磁場を打消すために巻戻しコイルを巻いている。巻戻しコイルを流す電流は磁場を作るのに用いた電流の方向を逆にしており、これにより逆方向の電流は互いに打ち消すので、アクリル板で固定している。

諸元

磁場	$B_T \max \leq 5 \text{ kG}$
立ち上がり時間	5.3 ms
コンデンサ容量	2000 pF (= 200 pF × 10 個並列)
充電電圧	max 5 kV
蓄積電圧	max 25 kV
バンケー型コイル	18 個 (245 mm × 280 mm × 20 mm)
銅線	1.6 mm × 5 mm
総巻数	576 巻 (18 × 16 × 2)
巻数/コイル	32 巻 (16 巻 2 列)
温度上昇	°C (T ≤ 10 ms)

(九州大学工学部動力機械工学教室)

図 4-1. 当時の資料

(4)

(2) ジュール変圧器系

原理は普通のトランスと同じで、一次巻線に電流が流れるとファラデーの電磁誘導の法則により二次電圧が誘起される。電場 E によってプラズマの break down が起こり、プラズマ電流の維持が行われる。

諸元

石磁 厚 ; 0.01 V·sec

一次巻数 ; 40 巻 (20 × 20 巻、上下)

鉄心材料 ; 0.3mm 厚 2 方向性硅素鋼板

断面積 ; 10 cm × 10 cm = 100 cm²

$\pi (4.5)^2 = 63.6 \text{ cm}^2$

外形寸法 ; 120 mm × 90 mm × 10 mm

コンデンサ容量 ; 4 ~ 200 pF とまだ確定はしてない。

トランス概略図

$L_p = \mu_0 R \left(\frac{4\pi}{25} - 1.75 \right) = 5.3 \times 10^{-7} \text{ H}$ とする

$I_p = \frac{\Phi}{L_p} = \frac{0.01}{5.3 \times 10^{-7}} = 1.8 \text{ kA}$ 程度のプラズマ電流が必要と計算される。

(九州大学工学部動力機械工学教室)

図 4-2. 当時の資料

トロイダル磁場コイル系は一次巻線と、水平磁場、垂直磁場コイルからなる。架台が 2 分割方式だったので、水平磁場、垂直磁場コイルは組み立て後に外から手で巻き線を巻いた。ロシアの TM-3 トカマクではプラズマの放電開始を行うために水平磁場を印加しなければいけないということが論文にでていた。またプラズマ研の SPAC-II でも、水平磁場コイルを設置して用いていた。トロイダルコイルの設置誤差が大きいとどうしても水平方向の不整磁場ができてしまう。装置が小さければ小さいほどこの設置誤差の影響は大きくなるのである。従って、最初から、水平磁場コイルを設置して補正しようと考えていた。

真空容器は当時多かったガラス製のトラスとした。またトロイダル方向に大電場を印加して乱流加熱を行う目的だったので、ガラス製のトラスとしたのである。トロイダルコイルの中で組み立てるので、図 5-1, 5-2 の様にトラス方向に 3 分割とした。大牟田の旭ガラスで製作したと覚えている。3 分割方式は組み立ててみるとなかなか難しく、また、真空排気ポートなど精度が出てなく、何度も大牟田まで村岡先生と足を運んだのを覚えている。しかしついには真空にすることはできた。

ガラス製の真空容器の周りには、プラズマの位置制御ができるようにアルミニウムの導体シェルを設置した。

これでプラズマの位置を安定化しようというものであり、当時はそのような形式のトカマクが多かったのである。このシェルはトーラス方向に3分割，上下に2分割の6個から成り立っている。ポロイダル方向にもトロイダル方向にも絶縁している。

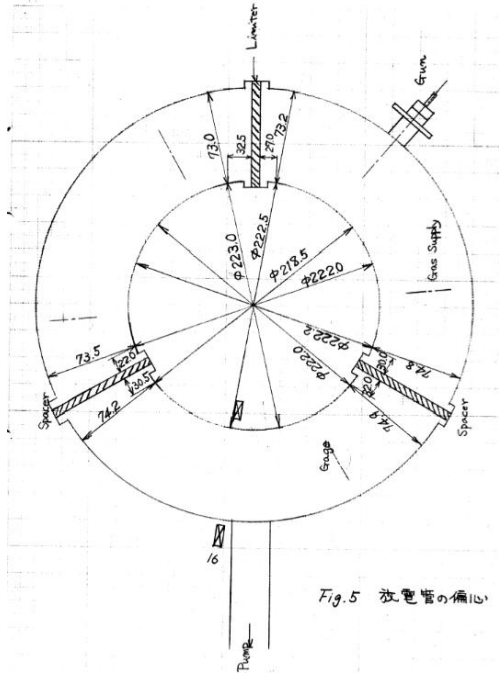


図 5-1. 放電管形状

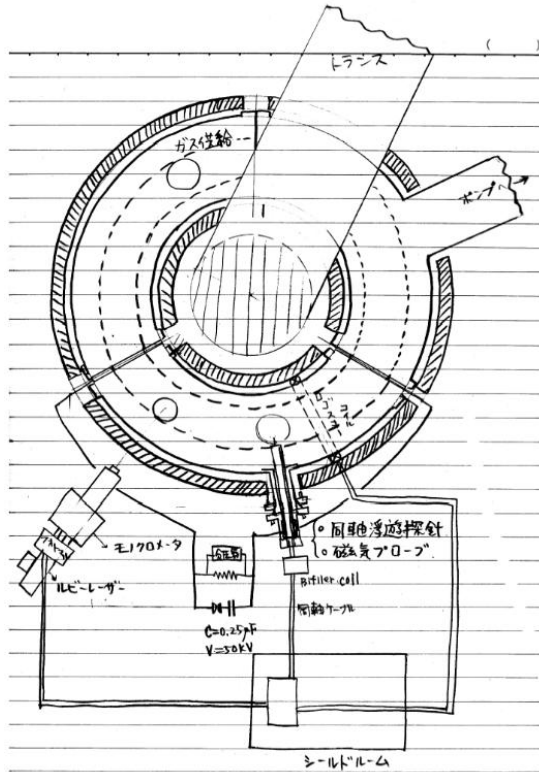


図 5-2. 放電管形状とアルミ導体シェル

当時は真空排気系はオイル拡散ポンプを粗びきポンプに直列にして用いている時代であった。ターボ分子ポンプが出てきたのはその数年後である。しかしその当時から、オイルが逆流して真空容器に入り、そのために不純物が多いと考えられ、問題視されていた。

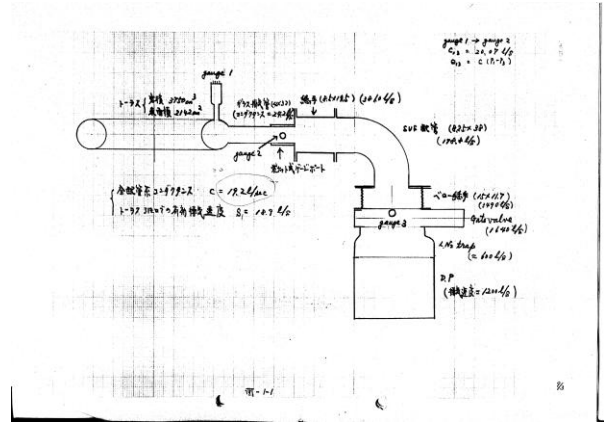


図 6. 真空排気系

このようにして、装置の組み立てを行い真空にひくことができた。一方、一次巻き線の回路即ちオーミック回路はコンデンサーを用いて LCR 放電回路とした。この回路はギャップスイッチで放電するものでその時に用いるトリガー回路や、実験のシークエンス全体を制御する制御回路は川崎技官に作っていただいた。予備電離装置としては同軸のプラズマガン放電管の上部に設置して、これも別の LCR 放電回路で行った。このプラズマガンは大阪大学の岸本先生(元日本原子力研究所那珂研究所長)のものを模倣して作ったものと記憶している。この同軸のプラズマガンが是非とも必要だったので、呉服町の町工場に行って、職人魂を目覚めさせるように懇切丁寧に説明し、ついでに値段も安くできるように頑張った。このときはなんとか急いで作ってもらったが、値段が高い(当時2万円)とあとでしかられた。

このようにして製作した装置であったが、それらに関する私の修士論文も探したが見つからなかったが、中間報告書は残っていた。また、実験データは中村一男先生に保管しておいていただいたが、装置の写真はなかった。長年見つからなかったが、つい最近 2017 年川崎技官が保管していることを知り、それをいただいた。唯一残された写真を図 7 に示す。この装置は箱崎の応用力学研究所の地下室の角にあった。写真を撮った場所の左側には銅板で作ったシールドルームがあり、それも自分たちで作ったような気がする。絶縁トランスを使ったノイズ取りの技術は乱流加熱実験を行っていた大阪大学の超高温プラズマセンターの後藤先生のところで学んだ。

右下の床の上に置かれている装置は水平磁場コイル用の直流電源である. 60 Hz の大きなリップルが乗っている電源であった. TRIAM-1 トカマクはこの装置を解体した跡に建設された.

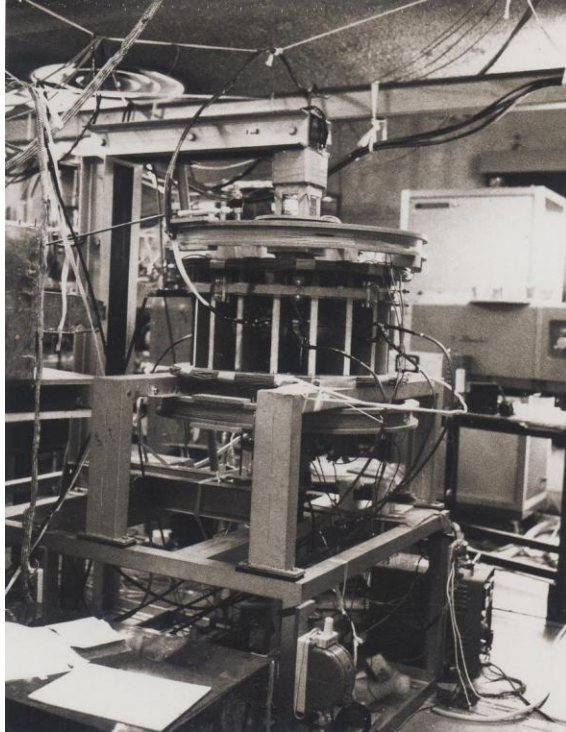


図 7. 九州大学トカマク第一号機の全景
(応用力学研究所, 村岡研究室)

実験

さて, 準備が終わってプラズマを点けようとしても点くことはなかった. 2~3 ヶ月悩みに悩んだ結果わかったのは 1 個のトロイダルコイルの巻き線の方向が逆になっていたからであった. トロイダルコイルのみを通電するとき異常に音が大きいと思っていたが, それは 1 個が逆向きでカスプ状のトロイダル磁場になっていたからであった. 磁気プローブを用いてトロイダルコイルの作る磁場を一個一個チェックしてみたら, あるところで磁場が逆転していた. そこで装置を分解し, 予備のトロイダルコイルと交換し再度組み立てて実験してみたら, 随分とトロイダルコイルの発する音が小さくなった. その後, Ar プラズマではあったが修士 2 年の 12 月 27 日にやっとファーストプラズマを生成することができた. トロイダルコイルの内部の巻き線の方向が間違っているとは夢にも思っていなかった. エポキシで含浸しているので, 外からは見えない. 一個, 一個きちんとチェックしなかった自分に落ち度があったということである.

プラズマを点けることができないことほどつらいものはない. 手がかりがなかなかないからである. 実験室に入るのもいやになっていた. しかし, 磁力線になったり, 電子

になりきったりして装置の中に入り込み, いろいろなことを想像し, 原因を考えた. その結果まさかの事態に気がついたのである.

結局プラズマは点いたが, 位置を測定する磁気プローブ等はまだ製作が追いついていなかったもので, 目でプラズマを見て判断した. 幸いガラス放電管だったので, プラズマが上にあるか下にあるかの区別がついた. 水平磁場を調整しながら, プラズマが真ん中に来るようにした. それらの結果得たプラズマ電流波形の写真を図に示す. プラズマ着火に関しては実験屋の”想像力”が重要であると思う.

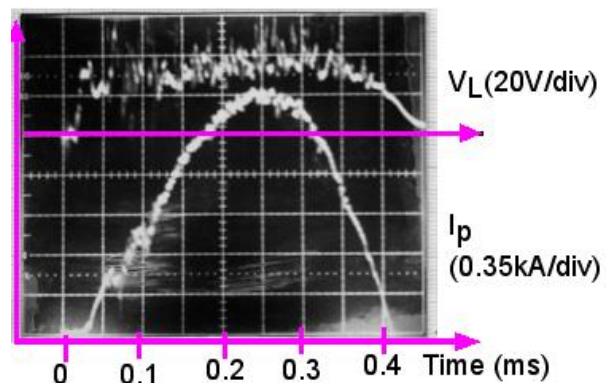


図 8. ループ電圧, プラズマ電流波形
(上:ループ電圧 30~40V, 下:プラズマ電流~2.1 kA)

図 8 にループ電圧, プラズマ電流波形を示す. ループ電圧はプラズマ電流がピークになっても 30V 程度と高く, スパイクが沢山あり, プラズマ電流はピークで 2.1 kA 程度であった. ループ電圧の大きさから不純物が多く低温のプラズマとわかるし, またプラズマ電流のスパイクが多いことから位置制御が悪く, プラズマがリミターにあたっていることが推測できる.

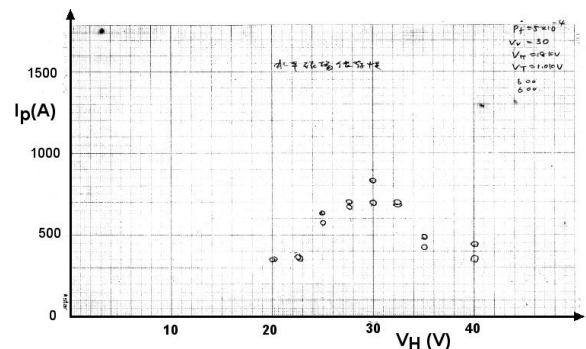


図 9. プラズマ電流の水平磁場依存性

プラズマを生成した後にできるだけ大きなプラズマ電流を得ようと努力し, 水平磁場依存性を調べた結果を図 9 に示す. 水平磁場を印加しないとプラズマ電流は全

く生成されない。その最適値でプラズマ電流は最大となる。水平磁場の最適値の大きさはこのときはわからなかったが、これはカナダの装置ではほぼ判明した。

結論

最終的にトロイダル方向に 2 カ所おいたリミター間に高電圧を印加して乱流加熱実験を曲がりなりにも行うことができた。博士課程に進学することもできた。人は、この装置は失敗だったのではないかと批判するかもしれない。しかしながら、この小さな装置は私にいろいろなことを教えてくれた、その後の核融合研究の原点である。もしあのとき投げ出していたら九大での核融合研究は今頃どうなっていたであろうか？歴史の微妙さを感じる。印象的だった鉄心のヒステリシス曲線、装置は一つ一つチェックせよ、特にコイルの巻き線の方向やその接続、水平磁場は小さい装置では特に重要、ガラスは不純物だらけなので使用しない。プラズマになりきって想像せよ、実験計画は理論的に精密に。この装置で学んだことは次に製作するカナダでの装置ですべて生かすことができると言いきることができる。

2. TRIAM-1 トカマク

このガラストーラス実験が進行中に、北島一徳先生によって次の予算が通り、最終的に TRIAM 計画がスタートすることになった。ガラストーラスでは不純物が多く温度も低いので、その計画を廃し、ステンレス製の真空容器の本格的なトカマクを製作し、そこで乱流加熱実験を行おうとするものであった。“トカマクの3条件”という激しい論争が当時あり、ステンレス製の真空容器で、プラズマ電流密度がある値以上でなければならないのでないかという意見が百田弘先生から出されたことを良く覚えている。もう一つが何かは覚えていない。新しい装置の導入にあたり、矢嶋信男先生が名古屋大学から伊藤智之先生を引き連れてこられた。その時一緒に東井和夫先生、中村一男先生の御 2 方が来られて本格的なトカマク製作がスタートした。ステンレス製の真空容器を持つ JFT-2 などの設計製作に携わった伊藤智之先生の指導の下、TRIAM 計画のなかで博士課程の学生であった私はプラズマ監視装置を担当させていただいた。

激しい論争が続いた、大変厳しい状況ではあったが、ログスキーコイルや、磁気プローブ、それらの回路等の設計、予備実験、製作などを担当させていただいた。ログスキーコイルや、磁気プローブ等簡単と考える向きもあるかも知れないが、村岡先生の指導の下に私は理論的計算も行い、実験的にもかなり精密にこれらを作り上げ、それらの周波数特性や、性質を徹底的に調べ上げ

た。それらは応力研所報に掲載されている。また、4つの磁気プローブにはトロイダル磁場や、垂直磁場等の不必要な磁場が入るのでそれらを取り除くための「打ち消し回路」も設計、製作し、実際の運転に役立つものを作り上げることができた。現在はソフトを用いて打ち消しを行うのが通例ではあるが、当時はアナログ回路で行った。そのためのログスキーコイルも沢山自分で製作しなければならなかった。

その後、河合先生の指導の下に 70 GHz のマイクロ波干渉計も製作し、密度測定も行った。その後は 140 GHz のマイクロ波散乱計も製作し、TRIAM-1 トカマクの乱流加熱実験においてイオン音波の計測を行い、学位論文を書くことができた。1980 年秋に、2 週間で学位論文を書きなさいと矢嶋先生に言われ、夜もあまり寝ず、手書きの学位論文を書き上げることができた。

TRIAM-1 では装置の運転は全くさせてはもらえなかったが、この装置は時々プラズマの点きが悪いことがあった。TRIAM-1 ではループ電圧は 90V 程度もあり、いろいろな装置のループ電圧を調べてみると 20~30V 程度であり、それらより高すぎる値であった。従って、次のカナダの装置では 20~30V に設定した結果、プラズマの着火や再現性は非常に改善された。

取り巻く状況には厳しいものがあったが、ガラストーラスでの誰にでもはできない貴重な体験や TRIAM-1 でのプラズマ計測装置を完璧に作り上げた経験は次のカナダでの実験に際して多いに役に立ったのである。むしろ関係者に深く感謝する次第である。

3. カナダ・サスカチュワン大学、

STOR-1M トカマク

博士号を取得して直ぐに、ガラストーラスと TRIAM-1 で乱流加熱実験を行っていた縁で、カナダ・サスカチュワン大学のポストドクトラルフェローとなってカナダに行くことになった。結婚式 1 週間後、1981 年 4 月 28 日に福岡空港から飛行機で旅立った。初めての海外旅行で、見知らぬ土地にいき、見知らぬ人に逢い、いつ日本に帰って来れるともわからずそこで暮らし始めた。飛行機の中で英会話の勉強を始めた。タイ航空でシアトルまで飛び、そこで乗り換えて、切符はそこで新たに買うように言われたが、バンクーバーに無事到着した。シアトル空港ではターミナルの出口に着く際に、トラムに乗って荷物と離ればなれにされ心配した。ターミナルのカウンターでブリティッシュコロンビア大学に行く日大の高橋先生に出会った。初めて逢った人ではあったが、お互い不安だったのでバンクーバーまで一緒に飛んだ。そこで 1 泊して大草原のサスカトゥーンに到着したが、日本人の

広瀬先生に出迎えていただいたのでやっと安心した。

サスカチュワン大学の物理学科プラズマ研究室ではトカマクを作る計画であったが、それは空心のトランスフォーマーで考えられていた。鉄心を用いた方が簡単にプラズマを点けれるし、電源も楽であるからそのように説得して鉄心で設計を行うことにした。私が行ったときには図 10 に示す STOR-1 装置は分解されていた。

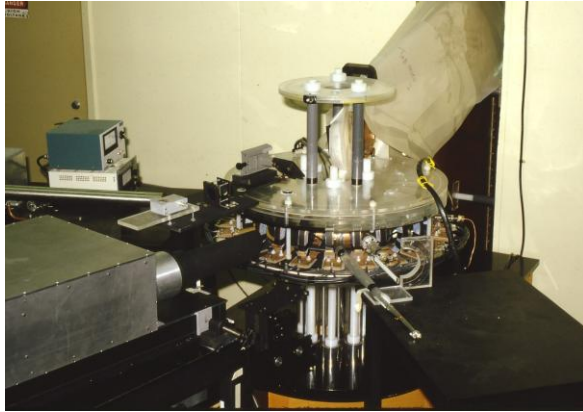


図 10. サスカチュワン大学の STOR-1 装置
(2017 年 4 月 桑原氏より)

そばには空心のトランスフォーマーがおいてあった。よく見るとトロイダルコイルはアクリル板の中の溝にはまる形で固定される方式で、今まで見たこともない固定方法であった。しかし以外と頑丈そうで、そのまま使えそうだったので、これを改造してトカマクを作ることにした。図 11 の断面図にでもわかるようにこれらのアクリルを 3cm 程度の厚さの G10 (high-pressure fiberglass laminate, composite material) ではさみ、大きなボルトで固定して 1 T のトロイダル磁場を生成できるように改造した。

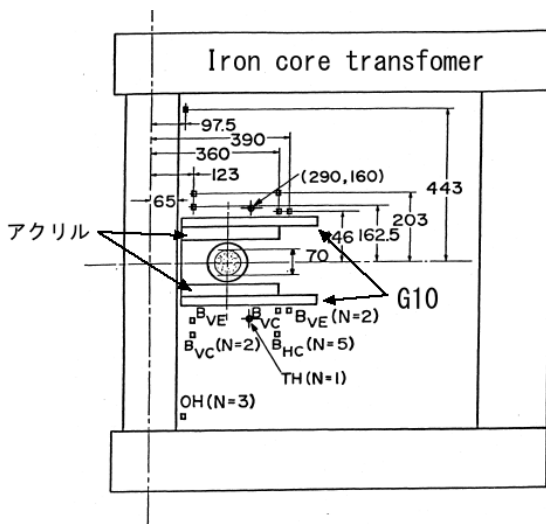


図 11. STOR-1M の断面図

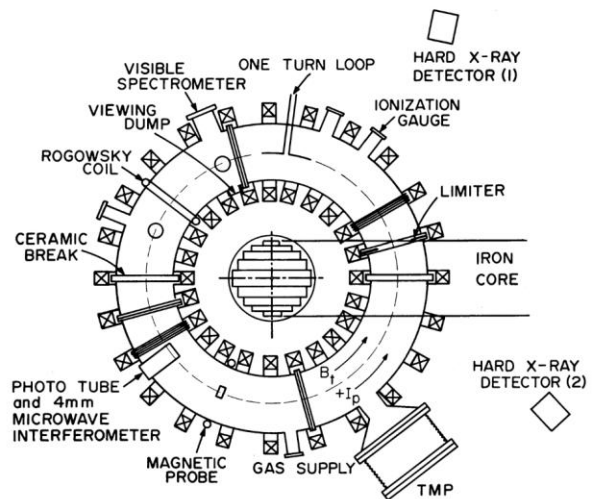


図 12. STOR-1M の赤道面

図 12 の平面図に示すようにトロイダルコイルは 24 個もあり、主半径は 22 cm でガラストラス (15 cm) よりも若干大きく、小半径は 3.5 cm であった。トロイダルコイルの内側が真空容器に接触しないように、トロイダルコイルの巻き数を 1 巻きだけ減らし、接続部も作り直した。またトロイダルコイルが裸のまま外側に絶縁物がなかったため、実験中の安全性を考え、カプトンテープで一つ一つ手で巻いて絶縁し、より安全なコイルとした。もちろんトロイダルコイルを逆に設置することのないように注意した。

鉄心のトランスフォーマーを作ってくれる会社は日本のようには簡単には見つからなかった。カナダに着いて間もないのに、米国物理学会のバイヤーズガイドを見ながら、北米の沢山の会社に自分で手紙を書き、また電話をかけまくって探した。どの程度かかったかは覚えていない。随分時間が経ってカリフォルニアの Elma Engineering という会社で作ってくれるということになり、図面を送って作ってもらった。今度は最初のガラストラスとは異なり、真空容器やトロイダルコイル架台を上から設置できるようにバットジョイントとした。バットジョイントの間にはマイラーシートをいれて絶縁し、トロイダル磁場の時間変化による誘導によって発生する電流が鉄心中に流れないようにした。

また、この装置の架台は TRIAM-1 のように SUS で作る予定であったが、値段が高かったので、テクニシャンの Mr. Jim Ratzlaff が compress wood を使ったらどうだと提案してきて、木を使うなんてあり得ないと思ったが、電磁誘導もないし、まあいいかと思い採用した。実際に年月が経っても全く変形もなく大変頑丈であり、正解であった。トロイダルコイルの G10 架台から SUS のパイプを伸ばしてこの木の架台に固定した。

もちろんステンレスの真空容器を採用することになり、

セラミックブレークを用いることにした。ステンレスの真空容器は広瀬先生が注文して下さったので、どこで作ったかは全く覚えていない。セラミックブレークはアメリカの京セラで作ってもらったと思う。SUS とセラミックの間のシール材には磁性体であるコバールを使う必要があった。トロイダル磁場に与える影響が非常に心配になったので、トロイダル磁場コイルの中に真空容器をおき、その赤道面に鉄粉をおいて、トロイダルコイルに通電して磁場に与える影響について調べた。その結果トロイダル磁場は乱されないことが明確になった。この予備実験によってプラズマを生成できるという強い確信を得ることができた。

また、サスカチュワン大学では STOR-1M の前まではガラストーラスであり、現代的な超高真空を扱ったことがなく不安だったので、テクニシャンである Mr. Jim Ratzlaff にドイツの超高真空の会社 Leybold Heraeus のアメリカの会社に電話をかけさせて、洗浄法など超高真空の会社から技術を習得してもらった。超高真空がトカマクにとっていかに重要かを伊藤智之先生から学んでいたので、この様な方法によってチームの一員にマスターしてもらって技術を習得した。真空容器は本体組み込み前に真空系のテストもかねて独立にテストした。ガス供給系とターボ分子ポンプすべて順調であった。その時の写真を図 13 に示す。

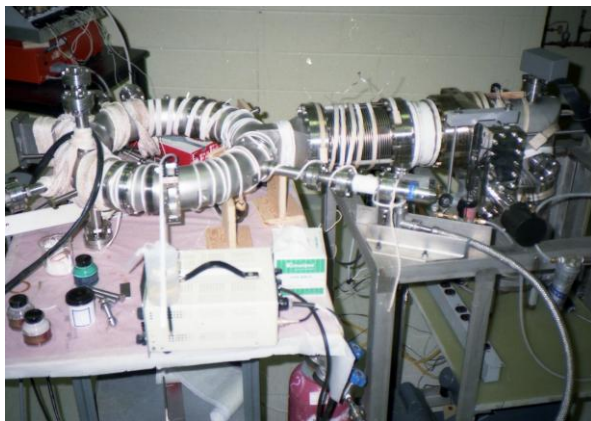


図 13 真空容器の組み立て前排気テスト

本体もちゃんと組み上がるかどうかを調べるために、図 14 に示すように真空容器を組み込む前に組み上げテストを行った。レーザー散乱用にビューイングダンプも SUS で製作して設置したが、その後に使用するまでには至らなかった。真空容器の上のポート形状を半径方向分布が測定できるように長方形にしたが、ガラス窓を取り付けるのに O-リングは使用できなかったため、途方にくれたが、Jim がインジウムを探してくれた。当時このような真空シール材は知らなかったため、Jim に尋ねたら”Soft

as shit”ということで納得した。この部品がなければ真空もうまく行かなかったと思う。

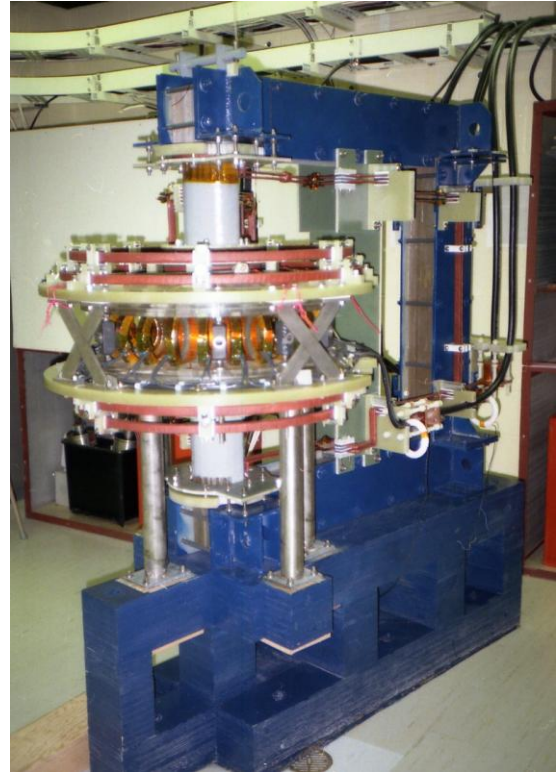


図 14. 真空容器を設置する前の STOR-1M トカマク

図 15 に示すように、プラズマ位置平衡用の垂直磁場コイル(2巻き)と、ブレークダウン時の補正用の垂直磁場コイル(2巻き)と水平磁場コイル(5巻き)を架台の上下に配置し、一次巻き線(全6巻き)を鉄心の上下に配置した。ブレークダウンに問題がないように垂直、水平磁場コイルの2つを設置したのである。あの九大第一号機でのつらい経験を2度と味わわないように周到に準備した。図 15 にコイルの接続部を横から見た写真を示す。ここにログスキーコイルを取り付けて、各コイル電流をモニターするとともに打ち消し回路のログスキーコイルも設置した。これらのトロイダルコイルは巻き枠を作り、旋盤でゆっくりと熱収縮チューブで絶縁した厚さ 2~3 mm の銅ベルトを巻き付けていき製作した。フィーダーとなる導線部もきれいに折り曲げて製作し、それに熱収縮チューブで絶縁し、さらにガラストープを巻き、コロナドープを塗布し、放電の防止を行った。TRIAM-1 のコイルにもコロナドープが塗布されていて同じ褐色であった。鉄心の色は TRIAM-1 トカマクと同じ色にしたいとぼんやり思っていたが、それは Prof. H.M. Skarsgard と広瀬教授が決定し、紺色のペンキを Mr. J. Ratzlaff に塗ってもらっ

た. 図 14 の写真を見ればわかる様に, STOR-1M は九大第一号機のガラストーラスに見た目がそっくりなことに直ぐ気がつくであろう. STOR-1M は九大第一号機のガラストーラスと TRIAM-1 の計測器が発展的に融合して完成した装置である. このことについてサスカチュワン大学の人は誰も知らない. 2015 年エドモントンで開かれたカナダの物理学会 CAP congress (Canadian Congress for Physics) の招待講演で少し紹介したが, 装置の写真がなかったので, 印象に残ってないと思われる.

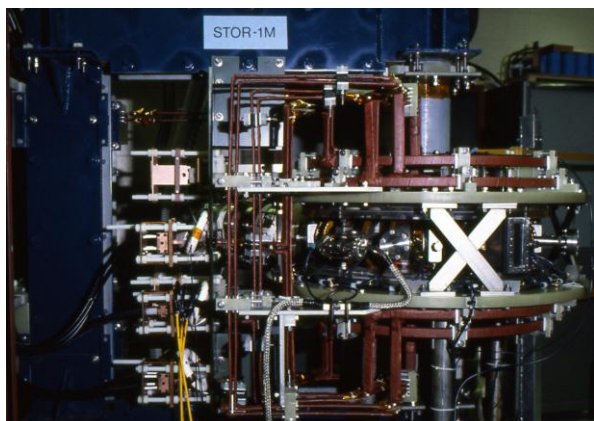


図 15. 真空容器設置後の STOR-1M トカマク
(左は PF コイルフィーダー部)

図 16 の写真に示すようにオーミックコイル用電源, その右側に垂直磁場と水平磁場用回路を設置し, 図 17 にトロイダルコイル用電源を示す. ここで, このコンデンサー電源を設置するラックを作る必要があったが, その取り付け用の鉄アングルもまずは自分で溶接して製作し, 途中から当時院生の Dr. A. Sarkissian (現在は Montreal の Plasma Ionique の社長) に替わってもらった. 九大では溶接もうまくできるようになっていたのだから, それを伝授したのである. コンデンサー回路の配線は自分で行き, 充放電用のマグネットスイッチはもう一人のテクニシャンである Mr. A. Witmans に作ってもらい, 制御系と連結した.

図 12 の平面図からもわかるように, 九大第一号機とは異なり, 鉄心の断面はきれいな円ではなくステップ状にし, コストを抑えた. その他いろいろな部品を作る必要があったが, shop と呼ばれる工作室で作ってもらうのであるが, 図面を出したままではいつ完成するか定かではない. そこで, 切断作業をする場合はあらかじめその材料にけがきをいれ, ボルト穴はパンチで小さい穴を開けておくということをして, 作業が直ぐにできるようにした. それでも進まない場合は自ら工作室の機械の使い方を教えてもらい自分で作業をするぞという態度をとると, 嫌々でもやってくれるという言う具合であった. ドイツ出身のフレッドはユンカースのパイロットだったらしく, こそ

っとそれを私に打ち明け, ちゃんと仕事を丁寧にしてくれた. 日独伊三国同盟のよしみがここでは生きていた. 一方, ロンドンの下町出身の体の大きい”Little”は, コックニーを話したので, なかなか英語の理解ができなかった. それでも何とか Shop の協力を得て, 装置を完成させた.



図 16. オーミック放電用電源回路



図 17. トロイダル磁場用電源



図 18. 充放電制御装置

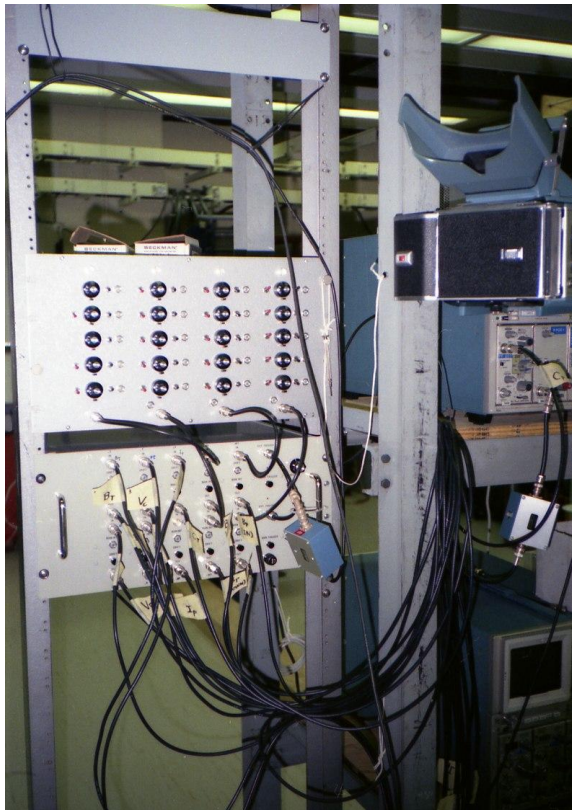


図 19. プラズマ監視用打ち消し回路と積分器

この放電制御装置の中にはソ連製の古い真空管を用いたものもあったので、不安であったがちゃんと正常に動いた。タイマーはオムロン製で日本語の説明書しかなかったのでテクニシャンに説明する必要がある。これらの制御装置は当時のテクニシャンであった Art Witmans 氏に作ってもらった(図 18)。

プラズマ監視装置に代表されるロゴスキーコイル, 磁気プローブ, 打ち消し回路等, TRIAM-1 で製作した経験をそのまま生かし自分で作った。図 19 はプラズマ監視装置である。70 GHz のマイクロ波干渉計も TRIAM-1 で製作していたので, カナダではクライストロンを新たに注文し, 転がっていたマイクロ波部品を集めて, 足りない部品は注文, あるいは製作して, 自分で組み立てた(図 20)。フリンジ計数回路も製作し, 密度を測定することができた。計測器はこのように, TRIAM-1 トカマクで全部経験済みだったので, さらに良いものを作ることができた。実験室にはケーブルトレイを設置し, ノイズが入らないようにグラウンドループに注意して設計した。現在はオプティカル結合器が発達し, グラウンドループを切ることが簡単に行えるが, 当時は全体的な回路図を書き, ループができないように注意したものである。ノイズに関しては九大第一号機は乱流加熱の短時間パルスであったためにノイズが問題であった。そのためにその時徹底してノイズ除去法を研究していた。従って, シールドルームを作ることなく実験を行うことができた。最終的に完成した STOR-1M トカマクを図 21 に示す。

なお, これらの作業には当時院生の Mr. S.W. Wolfe や Summer student にも手伝ってもらった。

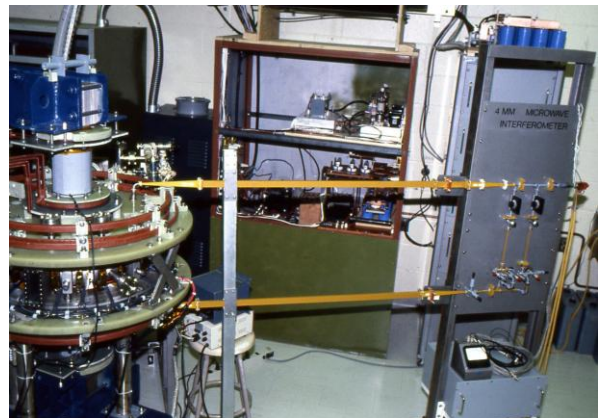


図 20. 70 GHz マイクロ波干渉計

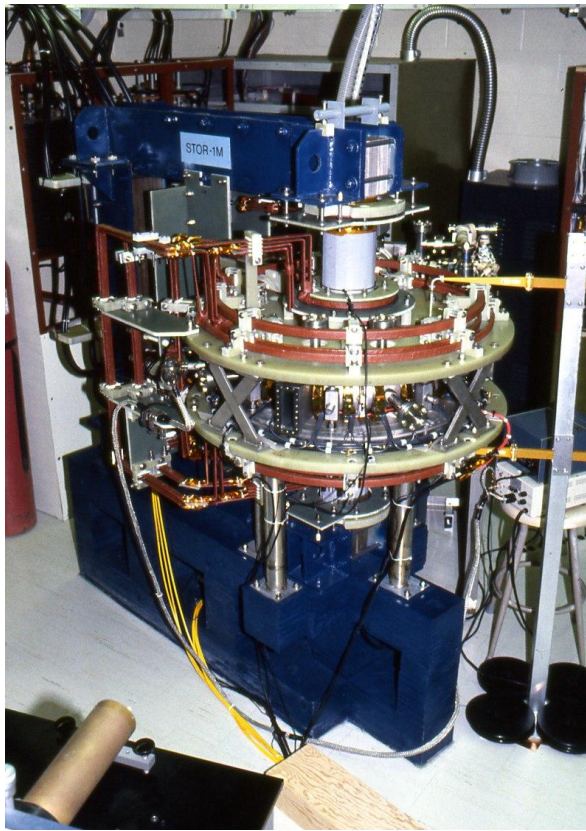


図 21. STOR-1M の全体図

実験

設計を始めて製作完了まで 2 年半を費やした。装置建設の進捗が遅いと思われていた様だが、きちんと計算しながら精密に進めていたので、長時間を要した。また、現在とは異なり、部品を注文しても1ヶ月くらいかかることもあり、その時間も計算に入れて計画的に装置作りを進める必要があった。実験は一人で行えるように図 22 に示すように制御、計測装置を配置し、効率化を図った。実験用の机も、スペースが限られていたので、自分で図面を描き工作室 (shop) で作ってもらった。



図 22. 制御ラックと計測用オシロスコープ
(一人で実験可能な様に設計)

このような努力の甲斐あって、ファーストプラズマの生成は 1983 年 11 月 25 日の 2 ショット目だったと思う(図 23)、プラズマはこのように直ぐにできた。もちろん、壁がまだきれいではないので、ループ電圧は高いことがわかる。その後放電洗浄を続けて 200 ショットくらいしたら、真空容器の壁がきれいになったためにプラズマのブレイクダウンが起きなくなった。ECRH などの予備電離装置はないので、数 MHz の高周波を真空容器の上と下に置いた 1 巻きループに印加するようにし、予備電離プラズマは目には見えないがブレイクダウンは起きるようになった。イオンゲージとこの高周波によって再現性の良いプラズマが生成されるようになった。これは後述の STOR-M トカマクでも同じである。

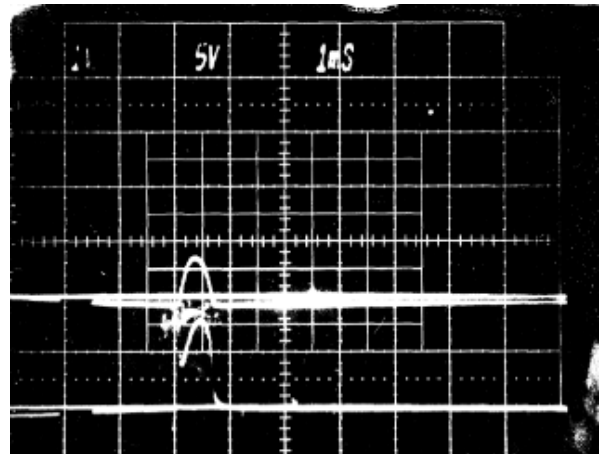


図 23. ファーストプラズマ 1983 年 11 月 25 日

鉄心を用いた九大第一号機のヒステリシス曲線が変だったので、この装置で精密に測定した。特に鉄心の作るイメージ磁場の数式(比透磁率 ∞ の場合の変形ベッセル関数を用いた式)を広瀬先生が導いて下さったので、これを数値計算し、イメージ磁場を実験的に検証する実験をプラズマを生成する前にすでに行っていた。すなわち、一次巻き線に電流を流して鉄心を飽和させる時と流さない時の水平磁場を測定して比較する。鉄心を飽和させるとイメージ磁場はなくなるので、これを利用してイメージ磁場の計測に成功した(図 24-1)。図 24-2 に示すようにヒステリシス曲線もきれいなのが得られた。また、これらの知識を利用して鉄心トカマクで電流駆動を行うとどうい挙動をするのかを世界に先駆けて調べ論文にした。

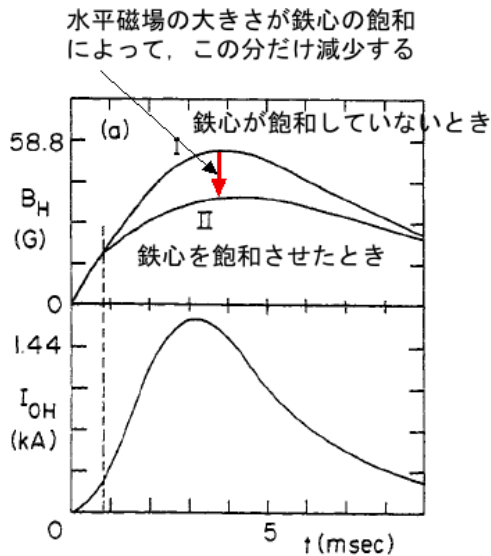


図 24-1. 鉄心を飽和させたときの水平磁場の変化

こうして、プラズマが生成されて直ぐに STOR-1M に関する最初の論文を出すことができた。設計を始めて先駆的な実験結果を出すまでの時間はトータルに見るとむしろ短かったのではないかと思う。

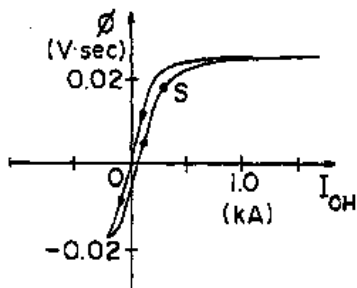


図 24-2. STOR-1M のヒステリシス曲線
(Plasma Physics and Controlled Fusion, 27
(1985) 395 図 15 から転載)

主半径 22cm という小さな装置で, SUS の真空容器にした結果, 九大の大学院時代のガラストーラスとは異なりベース圧力は 4×10^{-8} Torr, トロイダル磁場は 1T, プラズマ電流は 4~7kA, ループ電圧も 2~3V と低く, 初期線密度 $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, 電子温度 $T_e = 200 \sim 300 \text{eV}$ と大学院時代から憧れていた不純物の少ない高温プラズマを得ることができた。ガラストーラスよりも主半径は若干大きい。現在でもこの小型サイズのトカマクでループ電圧の低い即ち, 温度の高そうな世間いっばしのプラズマを得ている小型トカマクの中では未だ世界最小のサイズであると思う。

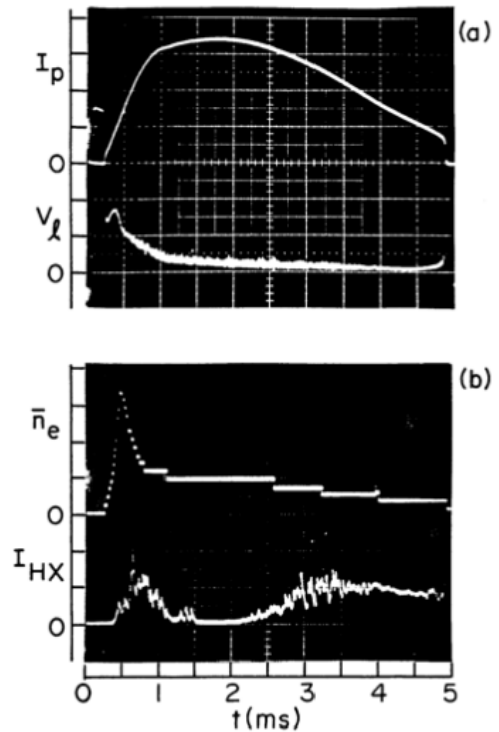


図 25 STOR-1M における通常放電波形
プラズマ電流(1.32kA/div), ループ電圧(10V/div),
線密度($2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}/\text{step}$), 硬 X 線波形

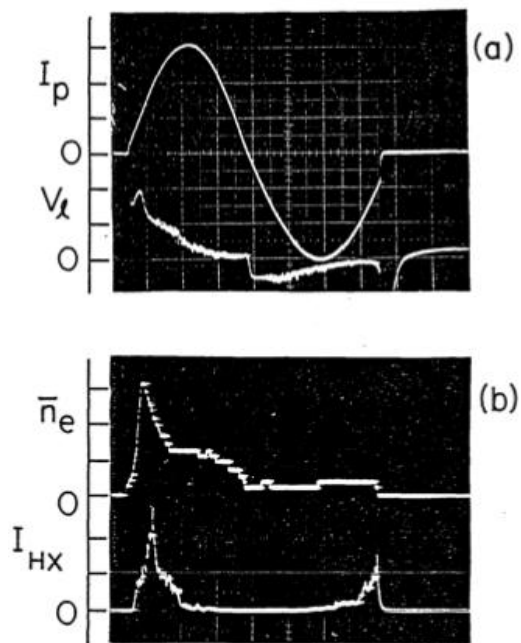


図 26. ACトカマク放電
プラズマ電流(1.32kA/div), ループ電圧(10V/div),
線密度($2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}/\text{step}$), 硬 X 線波形
(Nucl. Fusion, Vol.27, No.4 (1987) Fig. 1 より転載)

他の研究室でできているトカマク放電を小型装置で生成することができてもそれでは何も新しい結果を生み出すことにはならない。そこで通常形式の放電をきれいに作れるようになった後に、ACトカマク放電を行うとみんなに宣言してその 1 週間後に成功させることができた。モントリオールにある TdeV トカマクは当時計画中であったが、ACトカマク放電が提案されていたので、それが本当に可能であるかどうかを小型装置で確かめておけば、彼らも安心して AC トカマク実験に取り組めるであろうと当時の私は考えた。彼らの計画をサポートするために AC トカマク実験を行ったのである。しかしながら私のポストドクとしての義務は乱流加熱実験を行うことだったので、しばらく中止し、乱流加熱回路の完成と実験に集中した。その後 AC トカマク実験を行う時間ができ、データを集め論文を書いた。最初の論文は見事にリジェクトされた。プリンストンの研究者が興味がないので、AC トカマク実験など意味がないというコメントであった。そこで Nuclear Fusion 誌に投稿し直したが、またあまり良いコメントではなかった。そこで Prof. H.M. Skarsgard と話し合い 1986 年京都で行われた IAEA 国際会議にて、Nuclear Fusion の Editor であった C. Bobeldijk 氏(2014 年逝去)に再投稿論文を直接手渡すことにした。その時にっこり笑って Editor の部屋に入り手渡そうと話し合い、実際そのようにした。その結果ついに IAEA 会議の最後の日にアクセプトの手紙がメールボックスに入っていた。AC トカマク実験の論文を世に出すことは結構大変であった。当時は RF や NBI による電流駆動の研究が圧倒的に多く行われていたが、核融合が起きるような高密度ではこれらの電流駆動は効率が悪く、困難になるので最終的には使用できない可能性が高いと私は考えている。これは現在でも同じ状況であり、何も改善されていないので、D-T トカマク炉で定常な発電をするには AC 運転にした方が確実である。この最初の論文が出版されて 7 年後にやっと JET トカマクのような大型トカマクでも AC 運転が可能であることが実証された。その後いろいろな装置で実験が行われたが、TdeV では結局何の実験も行われなかった。彼らには本当は興味がなかったのかもしれない。このようにして一応世界的には受け入れられることにはなったが、未だ認識は低い。

プラズマが点いて、さらに水平磁場が重要であるというデータを STOR-1M でも獲得した(図 27)。それは AC 運転の第 2 の逆方向のプラズマ電流ができる条件として得られている。次の図で赤の線で囲まれた領域が良好なプラズマ電流が生成される場所である。11 G が最適で ± 1 G 以内に水平磁場をかけると第 2 のプラズマ電流がきれいにできる。ブレイクダウンはもう少し広い水平磁場領域で起きるが、このような小型トカマクでは地球磁

場の数倍程度の大きさの磁場に影響を受けるということがわかった。現在も数は少ないが小型トカマクが製作されている。しかし、そこではほとんど水平磁場コイルを設置していないようである。40 年前に私が得た教訓が世の中に全く流布していない。また、ガラスで真空容器を作っている所もある。歴史は単に同じことの繰り返しであろうか？

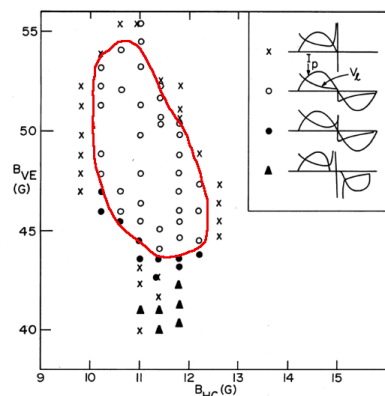


図 27. AC 運転における第 2 プラズマ電流生成領域 (Nucl. Fusion Vol.22 (1992) Fig. 7 に追加)

STOR-1M の目的は乱流加熱実験であった。加熱パルスも無事に印加できるようになった。このテーマでは A. Sarkissian が論文を書き博士号を取った。また、S.W. Wolfe は STOR-1M 全体を論文としてまとめ、博士号を得た。

日本に帰国した後、オーストリア国立大学から再びサスカチュワン大学に戻ってきた桑原博士から、サスカチュワン大学を訪問したあのブートストラップ電流を発見した英国の Bickerton 博士がこの STOR-1M を見て、よくできていると褒めてたよと言うのを聞いた。私は美しい装置作りを目指していたのでうれしかった。何故なら美しい装置からは美しいすばらしい結果が得られるからである。即ち、装置の精度がよく、完成度が高い装置は美しく、そのためにいいデータが得られると私は思う。九大第一号のガラストラスはお世辞にも美しいとはいえなかった。それを乗り越えることを目指していた。この STOR-1M トカマクはカナダの最初のトカマクで、世界で最も小型で、世界最初の AC トカマク放電に成功した three one であることを今でも誇りに思っている。図 28 と 29 に装置のそばでスタッフと記念撮影した写真を示す。

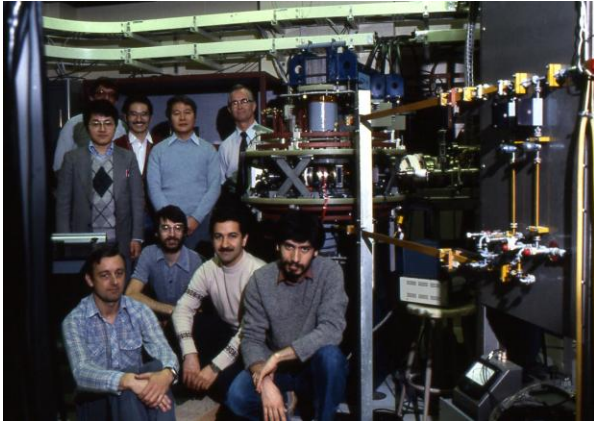


図 28. STOR-1M のスタッフ一同 1984 年前列. A. Witmans, S.W. Wolfe, M. Emammi, and A. Sarkisian
後列: Jim Ratslaff, O. Mitarai, O. Ishihara, Prof. A. Hirose, and Prof. H.M. Skarsgard

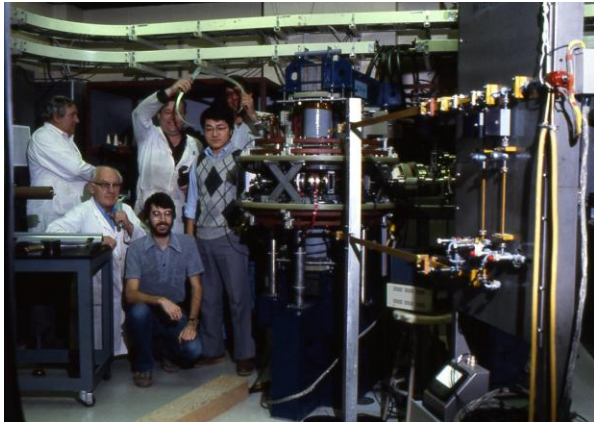


図 29. STOR-1M の製作に携わったテクニシャンら Little, Fred, Sean, Roi, Osamu and Jim

1988 年 STOR-M が完成した頃 STOR-1M はシャットダウンされた。その後装置はずっとそのままであったが、ユタ州立大学の Prof. F. Ward がサスカチュワン大学を訪れた時に、この装置が気に入る、ポストドクの Dr. A. Shign をスカウトし、米国に移送し、そこでプラズマ生成実験が再開された。図 30 の写真は 2008 年に私がそこを訪問したときの写真である。現在は DOE からの予算もなくなり、装置は残念ながらシャットダウンしたままである。

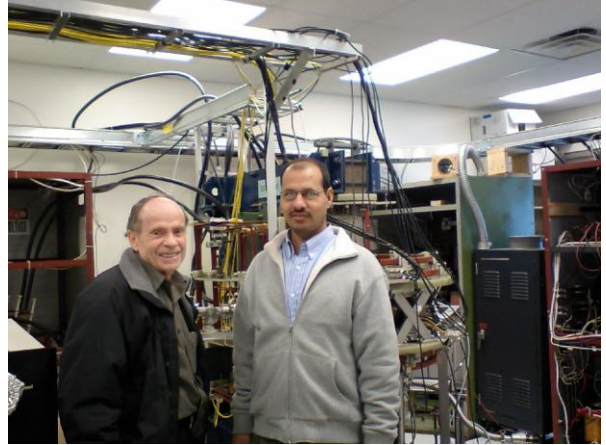


図 30. ユタ州立大学に移管された STOR-1M トカマク Prof. F. Ward and Dr. A. Shign

4. カナダ・サスカチュワン大学, STOR-M トカマク

STOR-1M の後継機が STOR-M トカマクである。この装置の鉄心も Elma Engineering で作ってもらった。

この装置は広瀬先生が基本設計を行った。変形ベッセル関数を使って無限長鉄心の作る磁場の計算式を用いて、鉄心のイメージ磁場をも考えて一次巻線の配位を考えた。いままでは一次巻線の配位は(特に日本の鉄心トカマクでは)上下に決まっていたが、上から4段にわたって配置するという少し変わったコイル配置であった。鉄心のイメージ磁場を有効に活用するような設計になっていた。

そこにオーストラリア国立大学から帰ってきた桑原博士がオーストラリアのトカマクで使用していた、オーミックコイル回路と垂直磁場コイル回路を一緒にした形式のコンバインド回路方式を採用し、電源を簡単化させるようにした。鉄心トカマクではプラズマ電流が流れると、一次巻線電流も垂直磁場コイル電流もほぼ同じ波形を示す。時間が経って鉄心の磁束が消費される分だけずれが生じる。そのずれの分をフィードバックコイルで補おうとするユニークな回路である。なるほどそのような考えもあるのだと感心していたが、その後の私の STOR-M での実験でこれらは大いに役立ったのである。

また、STOR-M の製作にかかわり、特にトランジスタアレイを用いたフィードバック制御装置を製作したイラン出身の Dr Magid Emmami は、それらによって博士号を取得した優秀なエンジニアであった。

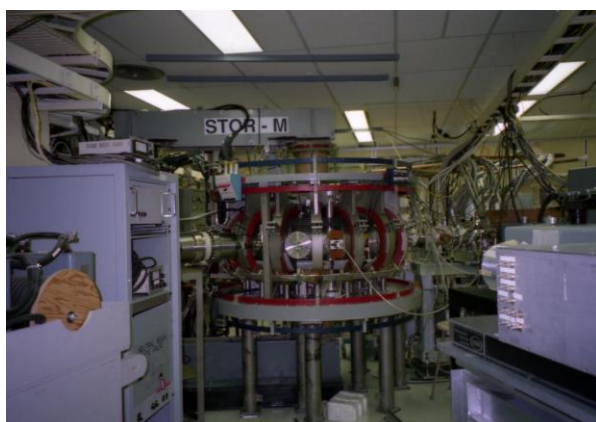


図 31. STOR-M トカマクの全体図

私は 1984 年 9 月に日本に帰国したので、STOR-M トカマクの製作にはあまり携わってはいないが、その後、修理や運転には大いに関わった。STOR-1M の時の院生 Dr. S. W. Wolfe が運転していたが、通常のカマク放電は得られていなかった。そこで 1987 年ボストンでのアメリカ物理学会からの帰りに一週間ほど立ち寄り、実験を行ってみた。彼は STOR-1M トカマクの運転の経験値を用いて、水素ガスの封入圧力を STOR-1M トカマクと同程度に高く設定していた。そこで、私が封入圧力を 1.5×10^{-4} Torr 程度に下げたらあつという間にループ電圧の低いカマク放電が得られた。小型装置では体積が小さいので、封入圧力を高くして、また大型装置では封入圧力を低くして、トータルの粒子数を同程度にする必要がある。これは核融合炉の立ち上げの計算でも同じである。このようにして STOR-M (図 31) はきれいなカマク放電ができるようになった。

また、鉄心を用いていたので、作業中の鉄粉が鉄心に多く付着して放電時に火花が飛ぶことが多かった。そこで、徹底的に掃除をして、バットジョイントの絶縁物も作り直すなどして、やっと問題なくカマク放電が得られるようになった。鉄心カマクでは近くで工事をした場合、鉄粉が付着したりするので、定期的に掃除をした方が良い。

私はより大きなカマク装置で AC 実験を行いたかったので、AC トカマク運転で重要な電流のソフトランディング実験をまず行った。そこでわかったことは STOR-1M では LCR リンギング回路を利用できたので 1 つのコンデンサーで十分であったが、STOR-M では回路の抵抗が大きく、LCR リンギング回路は利用できないことがわかった。また単極性の電解コンデンサーを用いていたので、回路を改造する必要がある。そこでオーミック回路を改造して第 2 バンクを逆極性に充電し、外部から AC 運転が可能ないようにして、AC トカマク実験を行った。その際第一バンクは逆電圧がかかる可能性があるため、ニチコン製のリバーシブルの電解コンデンサーを日本から持ち込んで実験を行った(図 32)。その後、さらにコンデンサーを第 3 バンクとして追加し(図 33)、1.5 サイクル AC 運転まで行った(図 34)。このようにして AC トカマクの論文を何編か書いた。これらの実験においては学術振興会特定国派遣事業や科研費国際学術研究による援助が大きな役割を果たした。この AC トカマク実験は D-T トカマク核融合炉の準定常化のためのものであったが、あまり問題がないので、その後 AC 実験ではやることなくなくなり、しばらく共同研究はストップしてしまった。

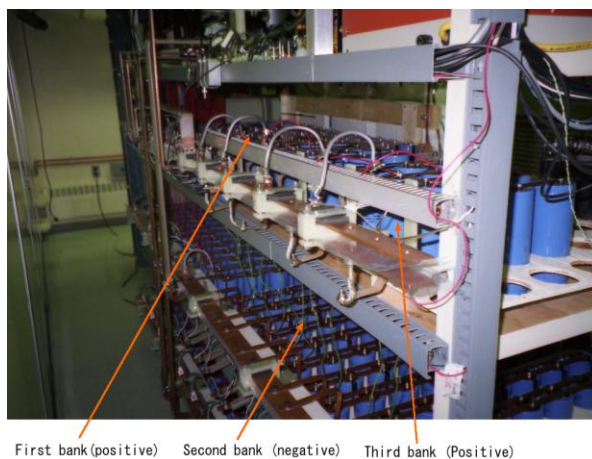


図 32. AC 運転用コンデンサー

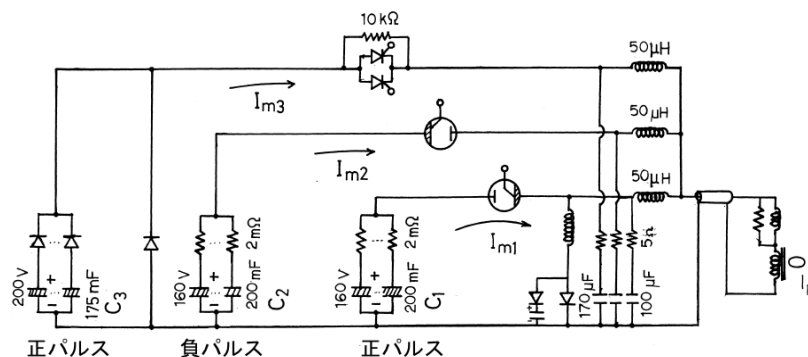


図 33. 1.5 サイクル AC 運転用回路図

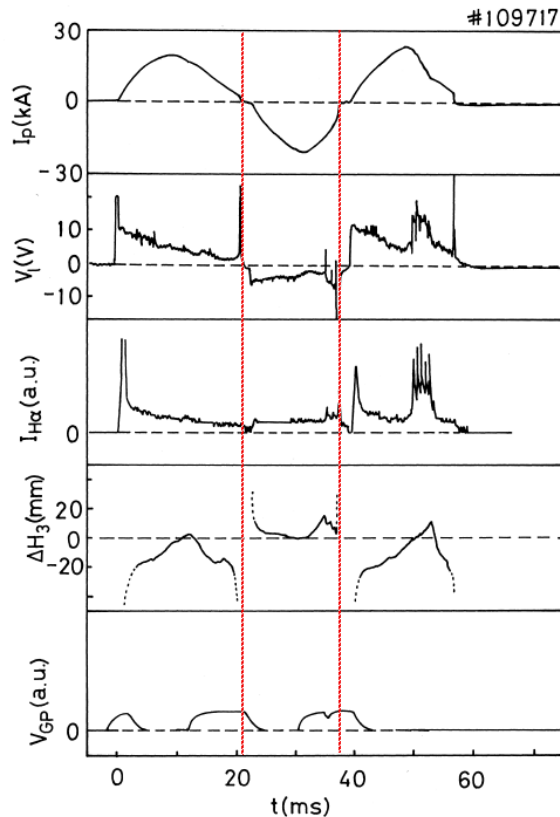


図 34. 最終的に得られた 1.5 サイクル AC 電流波形
(Review of Scientific Instrument, 68 (1997) 2711

Fig. 7. に追加)

一方、スフェリカルトカマクの中心ソレノイドなしでのプラズマ電流立ち上げの研究も行っていた。原研の西尾博士が最初に言い出した”鉄心を中心部に入れると中心ソレノイドなしでもプラズマ電流を立ち上げることができる”のではないかというアイデアに触発されて、STOR-M 鉄心トカマクでそのような実験ができるのではないかと考え始めた。鉄心トカマクをずっと研究してきたので、世界でもこのような実験をできるのは私くらいであろうと思っていた。この新しいアイデア、即ち、鉄心トカマクでは巻き戻しのない垂直磁場コイルによってプラズマ電流を生成し、鉄心が飽和してからもプラズマ電流は維持できるであろうという仮説を実証すべく、2007 年に行われたカナダ物理学会(CAP Congress)でサスカチュワン大学を 1 週間だけ訪問した機会を利用した。滞在 2 日目に中心ソレノイドを切り離す作業を手伝ってもらい、垂直磁場コイルだけでプラズマ電流を駆動できることを 2 ショット目に示すことができた(図 35 から図 36 にコイル接続を変更)。その結果も含めて CAP の招待講演で話したことを覚えている。画期的な実験であった。このときにわかったことは、鉄心トカマクではどこに一次巻線をおいてもプラズマは点くということであった。

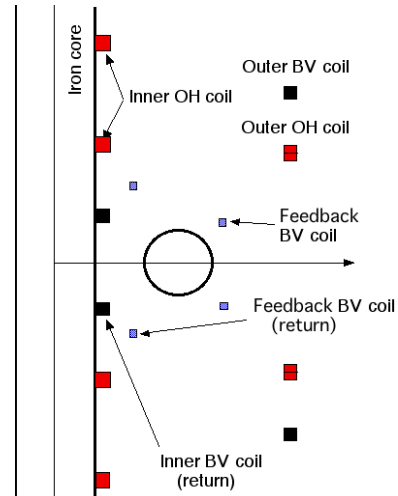


図 35. STOR-M 通常運転時のコイル配位

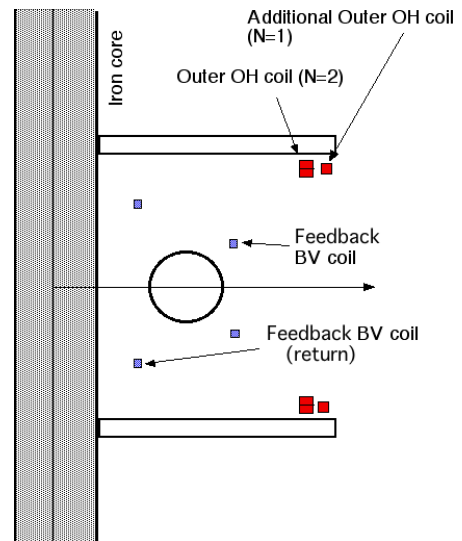


図 36. OH コイルを外し、CS なし電流立ち上げ用のコイル配位。Outer OH coil は垂直磁場コイルと同等

その後、鉄心を飽和させるところまで実験をやったがかなわず、定年前になってやっと科研費基盤研究 (C) をいただき、2012、2013、2014 年の夏休みに 1 ヶ月ずつ滞在し実験を行うことができた。中心ソレノイド (CS) がなくても、中心に鉄心のみを挿入すれば、巻き戻しのない垂直磁場コイルによってプラズマ電流を立ち上げることができ、さらに、鉄心が飽和しても空心コイルとして、同時にもう一つのフィードバック用垂直磁場コイルによる位置制御の助けを得て、プラズマ電流を駆動できそうであることを実験的に示すことができた(図 37, 2012 年)。その時のヒステリシス特性を図 38 に示す。この実験ではヒステリシス特性を眺めながら、飽和したところでオーミック回路と接続された外側 OH

コイル（垂直磁場コイルと同等）の第3バンクを印加するようにして実験を行った（図39）。第3バンクコンデンサーを図40に示す。実験が進行するにつれて、鉄心が飽和したら外側OHコイル（垂直磁場コイルと同等）の電流を大きくしなければプラズマ電流を維持できないので、第3バンクコンデンサーの充電電圧を大きくする必要が出てきた。その結果、2013年には第2バンクコンデンサーのトラブル、ダイオード部の絶縁の悪化、ダイオードそのもののサージ電圧による破壊等の事故が相次いだ。また、レールリミターを外していたためにプラズマに不純物が多く混入し、安定した放電がなかなか得られなかった。その結果を考慮し、2014年にはダイオード保護のために、サージ電圧を吸収するスナバー回路を取り付けるなど改良を施して、より大きな電圧を第3バンクに安全に印加できるようになった。

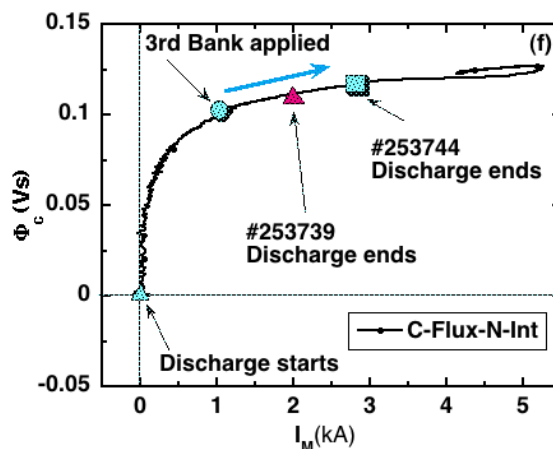


図38. STOR-M トカマクのヒステリシス曲線 (Nucl. Fusion 55 (2015) 063034 Fig.3 より転載)

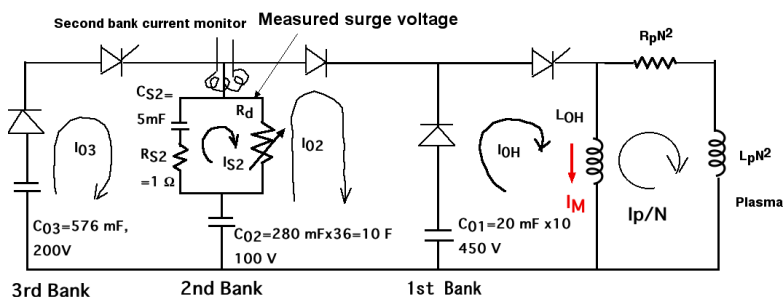


図39. 鉄心飽和時における電流駆動用オーミック回路における第3バンク回路

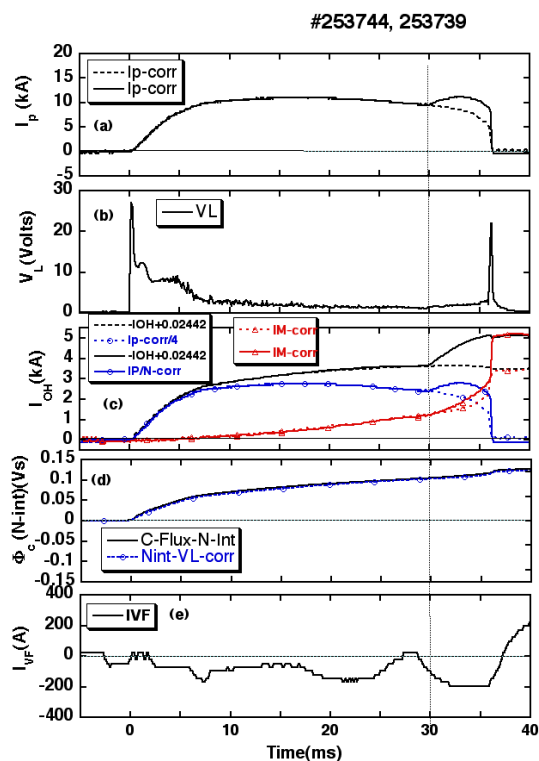


図37. 鉄心飽和中のプラズマ電流波形 (Nucl. Fusion 55 (2015) 063034 Fig.3 より転載)



図40. 鉄心飽和時プラズマ電流駆動用第3バンク

なお、鉄心の飽和の実験結果を解析するために、ここでは以前に用いた比透磁率 ∞ の式はもはや使えなくなった。そこで、有限の比透磁率の場合の変形ベッセル関数によるイメージ磁場の式を用いた。ヒステリシス曲線から、鉄心が飽和していくと放電中の比透磁率は徐々に減少していくのがわかった。

しかしながら、鉄心飽和中にプラズマ電流の位置制御がまだ完全ではないので、プラズマはディスプレイに停止している。鉄心飽和中のさらなる位置制御の最適化、外側 0H コイル (垂直磁場コイル) の巻き数依存性等、さらにこの実験を改善することを考えてはいるが定年してしまったので不可能となってしまったのが残念である。

以上のようにサスカチュワン大学に 1981 年からポストドクとして勤務し、STOR-1M トカマクの設計、製作、実験、その後帰国してからは STOR-M トカマクの運転、修理、回路を変更しての画期的実験を積極的に行ってきた。以下の図 41 には今までの共同研究の歴史を示している。定年前になって科研費基盤研究(C)をいただき研究が最後に急進展した。ありがたいことであった。

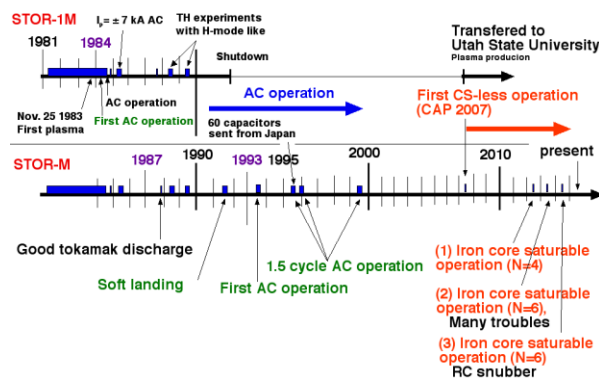


図 41. STOR-1M, STOR-M トカマクとの共同実験の歴史

5. TRIAM-1M トカマク

この計画においては、頼まれて低域混成波 (LHCD) の駆動装置のランチャーの基本設計を行った。8 GHz で設計計算をしてみると高周波の表皮効果のためにランチャー先端部の温度上昇がきわめて高く製作自体が非常に困難なことがわかった。冷却もほとんど難しく、私はほとんどあきらめて、忘却してしまっていたが、技術の進歩は早く、中村幸男教授の熱意もあって実際に使用できるようになって実験が行われた。私は今でもどうやってそれを TRIAM-M トカマクの関係者が克服したのかを知らない。

また、低域混成波ランチャーが完成し実験するときになって、伊藤智之先生からどうやってプラズマ電流を駆動したらいいかと聞かれ、乱流加熱用の上下にあるコイルを使って、予備プラズマ電流をパルス的に作りそこに低域混成波のパワーを印加したらどうでしょうかと答えた。実際それをやったらプラズマ電流が駆動されるようになって、この種の実験が始まった。喜ばしいことであった。

6. QUEST

TRIAM-1M トカマク計画が終わり、スフェリカルトカマク (ST) の QUEST 計画が始まった。ファーストプラズマを作るのがうまく行かないときは如何につらいかを九大応力研の第一号機のトカマクで体験してきた者にとって、そのような状況は QUEST では是非避けたかった。また、九大の第一号機のトカマクでの結果について公開ドキュメントを残していない者として、もしうまく行かないとき歴史から何も学んではないか、と批判することはできない。目の前で起こるであろうことについて見て見ぬ振りすることは核融合研究者としての良心に背くことになる。

今までは鉄心トカマクのプラズマ生成しかやってこなかったが、QUEST は空心であり若干異なる。しかし、空心トカマクは磁場ヌル領域を作っておいてプラズマ生成を行うというのが一般的であり常識化されていたので、中心ソレノイドからの漏れ磁場をキャンセルして、ヌル領域を作るキャンセルコイルを設置することを提案した。電源が沢山あれば、特別にキャンセルコイルを設置していなくても、ダイバータコイルやシェーピングコイル (垂直磁場コイルの上下に設置するコイル、PF2-6 コイル) 電流を調整することによってヌル領域を作ることは可能であるが、手間がかかる。当然 QUEST の初期段階では電源は不足している。そのような状況の元ではキャンセルコイルの設置がベターであることから、自ら設計し提案した。このコイルを置ける理想的な位置はすでに別のもので占められていたので、あいている場所を利用した。設置に対して多くの反対があって、厳しい状況ではあったが、中村一男先生が最後に予算を獲得して下さった。本当に助かった。私の方眼紙に書いていた図面を福岡機器製作所の湊本さんが 3D 図面に直してくれ、無事に製作、設置を行うことができた (図 42)。

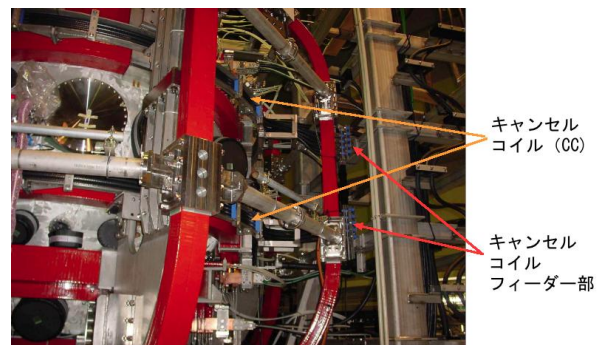


図 42. QUEST におけるオーミック放電のためのキャンセルコイル (上下 1 対)

その結果、プラズマ核融合学会の最中に、オーミック放電2ショット目にファーストオーミックプラズマが中村一男先生の手によって生成された。九大第一号機のトカマクでのつらい体験の二の舞を避け、私の核融合研究の原点である応用力学研究所、その装置を失敗に導くようなことはしたくなかったのである。私は修士以来の責任を果たしたつもりである。

なお、後に述べるようにSTには通常のアスペクト比のトカマクよりも多くの可能性があるので、今後とも積極的に進めて欲しいプロジェクトである。

7. 核融合炉の研究

7.1 ACトカマク核融合炉

核融合研究は核融合発電を目指した明確な目的の研究である。トカマク実験屋には核融合には興味がないという人が結構多い。目的研究である以上、小型トカマクの実験でも核融合を意識した実験を行うべきであると考え。ガラストラスでは核融合を意識した実験は行えなかったが、STOR-1Mでは明確に核融合炉を意識したACトカマク実験を行った。1970年半ばくらいから研究が活発に行われたプラズマ電流駆動は、核融合が起きるような 10^{20}m^{-3} 台の高密度プラズマ領域では電流駆動効率が悪いので、使用が困難であると思われた。従って、電流駆動効率のきわめてよいオーミック電流駆動を用いて、トランスフォーマ電流が最大になったら電流を減少、極性を換え、プラズマ電流を逆転させてかつ熱貯蔵装置を用いて準定常運転するいわゆるACトカマク運転をする核融合炉を考案した。電流駆動に関する状況は今も変わっていないので、ACトカマク運転は今後も研究を続けるべきと思う。

7.2 核融合炉のイグニッションの研究

これを契機に、帰国後1985年からD-T核融合炉の研究を始めた。研究費の少ない私立大学ではあったが、非常に運のいいことにパソコンが普及し初め、数値計算ができる環境ができた。その頃トカマク実験では閉じ込め時間が加熱パワーのルートに反比例するというGoldstonスケーリング則が出てきた。核融合のパワーバランスやイグニッション条件を考え始めた時に、パワーバランスの式を書き直すと加熱パワーと閉じ込め時間の自乗の積は、 $n\tau_E$ で表すイグニッション条件を与える式の3次元表示になり、その2次元平面がイグニッション条件を表すことを見つけた。さらにGoldstonスケーリング則を書き直して得られる加熱パワーと閉じ込め時間の自乗

の積が偶然にもこの3次元表示の等高線になることに気がついた。これをさらに改良し、イグニッション到達の目安となるイグニッションクライテリオンを見つけ、これを”峠の条件”と名付けた。こうして、核融合炉の研究に入り込んでいった。またさらにいろいろなトカマク炉やヘリカル炉のイグニッションの計算を行った。1980年代後半からはD-³He核融合炉の研究も始めた。

7.3 ヘリカル核融合炉のイグニッションの研究

1994～1995年のプラズマ核融合学会であったろうか、核融合科学研究所の相良先生に懇親会場でヘリカル炉の設計を手伝ってくれないかと誘われ、いいですよと言ってそれ以来今日まできている。NECのMS-DOSパソコンを投資してもらったので、これで計算をすすめることができた。不思議なことに核融合科学研究所でありながら核融合炉に興味のある人が少なかったようだ。核融合炉を設計してもそれは学術ではないという屁理屈を耳にした。今ある装置で、今までのテーマについて詳しく実験を行うことだけが学術的な研究であるみたいな雰囲気であった。これは私は”受動的な学術研究”であると思う。しかし我々の研究は学術自体が目的ではなく、核融合炉を実現することである。まだ完成していない核融合炉を達成するには柔軟な発想、より原理的、基礎的な発想で、矛盾した要請を満たさなければならない核融合炉のパラメータに立ち向かう必要がある。そのためにはいろいろな装置も考案しなければならないし、実験もしなければならないし、新しい理論的な研究も必要になる。前人未踏の道を切り開こうとすると、そこに必然的に面白い学術研究テーマが出てくる。核融合炉研究は目的研究ではあるが、必要は発明の母であり、問題を解決するために発明が生まれ、そこに学術的基礎研究テーマが豊富にわいて出てくる。そういう意味でむしろ核融合炉の研究は”積極的学術研究”であるといえる。このように周囲を取り巻く状況は核融合炉の研究に必ずしも好意的ではなかったが、相良先生と良く議論をし、一緒に前向きに歩いた。幸い最近では核融合工学部門もでき、以前よりは核融合に興味ある研究者が増えてきている。

1995年程度までは私はイグニッション条件などの時間的には依存しない条件を計算していた。当時、核融合科学研究所の野田先生は時間依存の方程式を解き、イグニッションにおけるヘリウム灰の研究をしていた。私はNECのN88BASICを用いてパソコンで計算していたので、速く計算はできなかったが、計算結果の図が直ぐに出てくるので大変便利であった。福岡工業大学で行われたプラズマ核融合学会で、野田先生に時間依存の計算は結構簡単ですよといわれ、それを契機に時間依存の計算を始めた。

LHD 装置ではペレット入射と LID を用いた時に驚くほどの超高密度のプラズマが得られた。もしこれが事実ならば熱的不安定領域での運転が必要になると考えられた。当時私は熱的に安定なイグニッション領域での運転しか考えたことはなかった。熱的に不安定な領域での制御は 1970 年代から 40 年近くいろいろな方法が提案され研究されて来たが、満足な制御法はまだ見つかっていなかった。従って私は不安定点での運転は不可能であるし、そこに研究の時間を割くのは無駄であると思っていた。一方でいろいろな方法を私は試していたのではあるが、ベータ値によって安定化を試みたり、プラズマ圧縮によって安定化を試みたりしていた。プラズマ核融合学会で私がヘリカル炉のイグニッションについて発表したとき核融合科学研究所の小森先生から質問があった。高密度プラズマはできているけど熱的安定領域でしか運転できないんですよ。ええ、そうかもしれません。そう答えた数日後に、今まで試した熱的不安定な領域での制御がすでに計算の中でできていたことを見つけた。核融合出力を用いて制御する PID 制御式において、いままで正であった符号を負に換えるだけで良かったのである。この制御アルゴリズムは擾乱に対してロバストであり、理解しやすく、複雑な非線形制御と称する方法よりも遙かに簡単なので、現実に使用が可能であると考えられる。プラズマ温度も 7~8keV と低いので、頑張ればペレットの入射も問題が少なくなる可能性がある。このように大きな可能性があるもののヘリカル炉における高密度運転の研究は私の研究以外にはなされていないのが残念である。

7.4 垂直磁場によるプラズマランプアップの研究

ST といえば、大きなプラズマ電流を許容はするが、流す能力を持たないという矛盾した存在である。つまり中心ソレノイドを大きく作れないので、大きなプラズマ電流を流すことが難しい。九大の第一号トカマクを作っているときに、九大電気工学科の小城先生のテータピンチを良く見学に行った。外側にあるテータピンチコイルに電流を流すと、その内側に逆方向にプラズマ電流が流れるのである。"ピン"と言う音がした。私はこれをヒントにして、横のものを縦に置き直して、トカマクプラズマの外側に設置されている垂直磁場コイルに電流を流すと、その内側にあるプラズマに電流が流れはざであると考えた。鉄心トカマクでは垂直磁場コイルは巻き戻しを行うので、こういうことはできないが、空心コイルのトカマクでは巻き戻しができないので可能であると考え、論文を書いた。不思議なことにこの論文は直ぐにアクセプトされた。しかし、ブリンストンの著名な研究者からそんなことはないと言われ

られた。そこで JT-60U トカマク実験装置の結果を調べていると、加熱パワーと垂直磁場でプラズマ電流が駆動されるという実験結果を見つけた。

その後、東大高瀬先生のグループとともに JT60U で実験を行い、確かに垂直磁場でプラズマ電流がランプアップされるという実験結果を示すことができた。これは中心ソレノイドの小さい ST 炉で非常に重要な結果である。従って、最初に小さなプラズマ電流が存在すれば、それに加熱パワーを印加するとプラズマは外側に広がる。それを抑えるように垂直磁場を印加すると、プラズマ電流が徐々に増大する。最初の小さな初期プラズマ電流を垂直磁場で作り、同時に位置制御も行うことは意外に困難なのでそれはしない方が良い。小さな中心ソレノイドで初期プラズマ電流を作るか、または中心ソレノイドを使わず鉄心をいれて初期プラズマ電流を作った方がやりやすい。それを示したのが、すでに述べた STOR-M トカマクにおける CS なし鉄心飽和実験である。

7.5 D-³He 核融合炉のイグニッションの研究

中性子発生が少ない、より安全な D-³He 核融合炉については 1980 年代後半からずっと研究を続けてきた。ヘリカル炉で D-³He 核融合炉ができるかどうか計算してみたが、今までの実験データの範囲ではどうも無理である。もちろん、高アスペクト比のトカマクと低アスペクト比のトカマク(ST)についても D-³He 核融合ができるかどうか計算した。ITER のような強磁場の高アスペクト比のトカマク炉では電子からのシンクロトロン輻射損失が大きく、発生する核融合生成粒子の加熱パワーのうち 70%程度がイオン加熱に使われない限り D-³He 核融合炉でイグニッションの実現は困難である。通常は電子加熱が主なので、特別にイオンを選択的に加熱するメカニズムが必要になる。そのようなメカニズムはまだ発見されていないので、この意味において、高アスペクト比のトカマクには将来性はないことになる。

一方、高ベータが達成できる低磁場の ST では、シンクロトロン輻射損失が小さくなるので、核融合生成粒子の加熱パワーのうち 40%程度のイオン加熱でイグニッションはぎりぎり可能である。この条件を保証するのが九大原子核の中尾先生から始まり、面々と受け次がれてきた D-³He 核融合研究の成果である。それは松浦秀明博士によって明確化された、14MeV プロトンの核弾性散乱によって核融合生成粒子の加熱パワーのうち 40%がイオン加熱に使われるという計算結果である。即ち D-³He 核融合を実現するには ST が一番可能性があるということである。

ちなみにこの D-³He ST 核融合炉のパラメータは主半

径 $R=6.7\text{m}$, 小半径 $a=4.2\text{m}$, 楕円度 $\kappa=2.8$, 核融合出力 $P_f=3\text{GW}$, トロイダル磁場 $B_t=4.0\text{T}$, 閉じ込め増倍度 $\gamma_{HH}=2.4\sim 1.8$ (IPB98y2), イオン温度 $T_i=120\text{keV}$, 電子温度 $T_e=97\text{keV}$, 電子密度 $n(0)=1.97\times 10^{20}\text{m}^{-3}$, ベータ値 $\langle\beta\rangle\sim 33\%$, プロトンや He 灰の閉じ込め時間比 $\tau_p^*/\tau_E=2$ である。この炉では小さな CS や鉄心を用いて初期プラズマ電流を立ち上げ、垂直磁場を用いて 100MA 程度までランプアップする。2GW 程度の制動輻射ロスをブランケットで熱に換えて発電するというものである。ここでプロトンや He 灰の閉じ込め時間比 $\tau_p^*/\tau_E=2$ が必要ということは灰の排気が今以上に困難であるということである。

また、このように高温の $D-^3\text{He}$ プラズマにおいては RF や NBI のような電流駆動は全く役に立たないことが計算して見るとよくわかる。このような電流駆動は低温度、低密度の場合のみにも有効であることを認識しておくことは今後の研究の展開を考える際に重要なファクターである。

$D-^3\text{He}$ 核融合は D-T 核融合に比して必要なパラメータが大きく、そのために問題点が明確に浮かび上がる。また、計算されていないテーマも沢山あり、何をやっても新しい。しかも、従来技術では立ち行かない場合も多く、新しい発想が必要になってくる。そういう意味で新鮮で、刺激的な研究領域である。

7.6 核融合炉の展望

現在までに得られているデータベースを用いて、D-T トカマク核融合炉、D-T ヘリカル炉、 $D-^3\text{He}$ トカマク核融合炉と幅広く計算を行ってきた。これらの結果を図にまとめることができる。

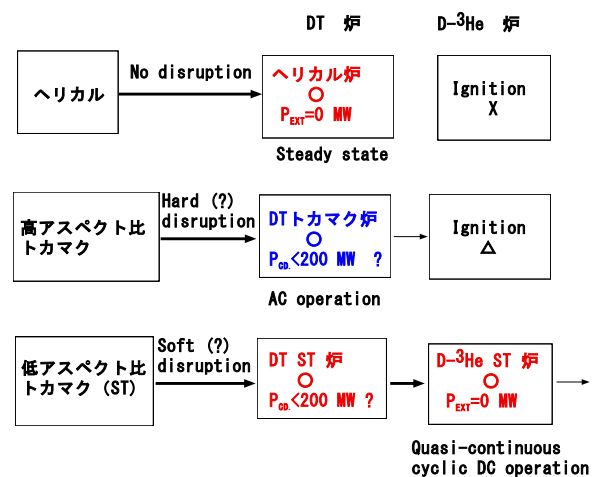


図 43. 今までの核融合炉研究からの結論と展望

ヘリカル炉においては $D-^3\text{He}$ 核融合などの先進核融合は困難であるが、トカマクがディスラプションを克服で

きない場合、最後に残るのは D-T ヘリカル炉である。高温・低密度運転はペレット入射等が困難で α 粒子の閉じ込めも悪い可能性が高いが、低温・高密度運転ではこれらは改善されるので有望である。

また ITER のような高アスペクト比トカマクにおいては D-T 核融合炉は可能であるが、 $D-^3\text{He}$ 核融合は有効なイオン加熱法が見つからない限り困難である。一方、ST は、D-T も $D-^3\text{He}$ 核融合もどちらも可能である。特に高ベータのために $D-^3\text{He}$ 核融合ができる可能性がある唯一の装置である。しかし 100 MA という大電流は計算上はできるが、もしディスラプションが起きたら一発でおしまいである。従って、トカマク核融合炉ではディスラプションの克服が一番重要となる。

トカマクやヘリカル核融合炉研究のなかで、その他の重要な問題は、燃料の供給と燃えかす灰の排気である。これは D-T 炉においても困難であるが、 $D-^3\text{He}$ 核融合炉ではさらに困難になる。ペレット入射はプラズマ温度とともに困難になり、コンパクトトロイド (CT) 入射も今のところまだ良くない。一方、燃えかす灰の排気はダイバータで行うが、現在のダイバータ研究は熱流束の低減だけに偏っている。同時にヘリウム排気などの燃えかす灰の排気も積極的に研究を行う必要があるが、それをも同時に解決しようとする研究者が少ない。

従って、今後、核融合を実現するには、ディスラプション、燃料供給、灰の排気の研究にもっと力を注ぐ必要がある。なお、これらの結論は、現在得られている実験パラメータが大幅に変化しない限り変わらないものと考えられる。

最後に

九大第一号機のとカマク (ガラストラス) について公開された資料はない。川崎昌二氏の記事が初めてである。今回、中村一男教授の最終記念講演原稿にあわせて、何か書いてみないかと誘われて、九大第一号機のとカマクの詳細について書こうという気になった。詳細といってもこの程度でしかないが。

このように私は鉄心トカマクからスタートし、次の鉄心トカマクを製作し、鉄心にまつわる研究をしてきた。ついには鉄心トカマクを飽和させて空心トカマクに移させる実験を部分的に成功させることができた。これらのトカマクでは中心に設置した鉄心の作るイメージ磁場は変形ベッセル関数で表すことができる。ではヨークの作る磁場はどうだろうか、どう計算すれば良いだろうかと長く考えてきた。

鉄心トカマク研究は終わりなのか？ いやそうではない。JET の研究者は今でも鉄心の精密なモデルを発展させている。最近気がついたことであるが、トカマク核融合炉

を鉄筋の建物内に作ることができればコストは安くつく。これに答えを与えることができるのが、この鉄心トカマクの研究である。このように鉄心の研究は終わりではなく、むしろ新しい問題である。何故なら ITER は実は磁性鉄筋の建物内に作られているからである。

また、より安全な D-³He 核融合炉は ST においてのみ唯一可能である。従ってより安全な炉を開発するために QUEST のような ST 研究をこれからも積極的に続けて行くべきだと考える。

注: 40 年も前のことであり、記憶の曖昧な所については、脚色するようなことがあってはいけないので、書いていない。

謝 辞

これまでの研究に際しお世話になった多数の関係者の皆様方に心から深く感謝いたします。

参 考 文 献

1. ガラストーラス
- 1) 御手洗 修, 「トーラス乱流加熱実験」1975年12月9日, 九州大学, 機械工学専攻MC2 修士中間発表原稿 (プラズマ着火前の発表).
- 2) 川崎 昌二, 「応用力学研究所での思い出」技術職員 技術レポート, October 2016 Vol.17 九州大学応用力学研究所.
2. TRIAM-1トカマク
- 3) 御手洗 修, 「トカマクプラズマの巨視量測定」九州大学応用力学研究所所報, 第48号(1978年)431.
- 4) O. Mitarai, "Macroscopic Measurements in a Turbulent Heating Experiment", Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. XXVII, 1979.
- 5) O. Mitarai, H. Nakashima, K. Nakamura, N. Hiraki, K. Toi, Y. Kawai, and S. Itoh, "Electron Density Measurements in the TRIAM-1 Tokamak", Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. XXVII, 1980.
- 6) 御手洗 修, 河合良信, 伊藤智之, "TRIAM-1M トカマクにおける4mmマイクロ波散乱計測の検討", 九州大学応用力学研究所所報, 第53号, (1980年) 91.
- 7) O. Mitarai, Y. Kawai, and F. Kako, "Buneman Instability in a Magnetic Field", Journal of Physical Society of Japan, 49 (1980) 1974.
- 8) O. Mitarai, Y. Kawai, "Numerical Analysis of Current-Driven Instabilities for Large Drift Velocities in a Magnetic Field", Journal of Physical Society of Japan, 50 (1981) 1375.
- 9) O. Mitarai, T. Watanabe, Y. Nakamura, K. Nakamura, N. Hiraki, K. Toi, Y. Kawai, and S. Itoh, "Measurements of the Dispersion Relation of the Low-Frequency Ion Acoustic Instability in the Turbulently Heated TRIAM-1 Tokamak Plasma", Japanese Journal of Applied Physics, 20 (1981) L41.
- 10) 御手洗 修 学位論文 「トカマクプラズマ中の電流駆動型不安定に関する研究」1980年 九州大学, 応用原子核工学.
3. STOR-1Mトカマク
- 11) O. Mitarai, and A. Hirose, "Model Circuit Analysis for the Current Drive Operations in a Tokamak", Nuclear Fusion, 24 (1984) 481.
- 12) O. Mitarai, S.W. Wolfe, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Measurements of the Image Field in the STOR-1M Tokamak", Plasma Physics and Controlled Fusion, 27 (1985) 395.
- 13) O. Mitarai, and A. Hirose, "Current Drive Operations in a Tokamak", Journal of Fusion Energy, 4 (1985) 395.
- 14) A. Sarkissian, A. Hirose, O. Mitarai, S.W. Wolfe, and H.M. Skarsgard, "Turbulent Heating Experiments in the STOR-1M Tokamak", Canadian Journal of Physics, 67 (1989) 884.
- 15) O. Mitarai, S.W. Wolfe, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Stable AC Tokamak Discharges in the STOR-1M Device", Nuclear Fusion, 27 (1987) 604.
- 16) A. Sarkissian, A. Hirose, O. Mitarai, S.W. Wolfe, and H.M. Skarsgard, "Turbulent Heating Experiments in the STOR-1M Tokamak", Canadian Journal of Physics, 67 (1989) 884.
- 17) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Plasma Density at the Current Reversal in the STOR-1M Tokamak with AC Operation", Nuclear Fusion, 32 (1992) 1801-1809.
- 18) H. Kuwahara, O. Mitarai, E.J.M. Van Heesch, M. Emaami, A. Sarkissian, S.W. Wolfe and A. Hirose, and H.M. Skarsgard, "Study of Enhanced Confinement and q=2 Disruptive Modes with Fast Rising Current in the STOR-1M Tokamak", in 11th

- International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/A-VII-3 (Kyoto, Japan, Nov. 1986) Vol.1, 413.
4. STOR-Mトカマク
 - 19) O. Mitarai, G. Conway, A. Hirose, H.M. Skarsgard, C. Xiao, L. Zhang, and W. Zhang "Experiments on the Current Rampdown Phase in the STOR-M Tokamak for AC Operation", Plasma Physics and Controlled Fusion, 35 (1993) 711-722.
 - 20) O. MITARAI, C. XIAO, L. ZHANG, D. McCOLL W. ZHANG, G. CONWAY, A. HIROSE, and H.M. SKARSGARD, "Alternating Current Plasma Operation in the STOR-M Tokamak", Nucl. Fusion 36, No 10 (1996) 1335-1343.
 - 21) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Plasma Density at the Current Reversal in the STOR-1M Tokamak with AC Operation", Nuclear Fusion, 32 (1992) 1801-1809.
 - 22) O. Mitarai, C. Xiao, D. White, D. MaColl, W. Zawalski and A. Hirose, "Feedback Control Experiments on 1.0 and 1.5 Cycle AC Operation in the STOR-M Tokamak", Review of Scientific Instrument, 68 (7), July 1997, 2711-2716.
 - 23) C. XIAO, O. MITARAI, D. WHITE, D. McCOLL, W. ZAWALSKI and A. HIROSE, "Tangential CT Injection and 1.5 Cycle AC Operation Experiments on STOR-M", IAEA 16th IAEA Fusion Energy Conference, Montreal, Canada, 7-11 Oct. 1996.
 - 24) A. K. Singh, J. Morelli, C. Xiao, O. Mitarai, and A. Hirose, "Investigation of Plasma Equilibrium in the Saskatchewan Torus-Modified (STOR-M) during Alternating Current Operation", Contribution to Plasma Physics, 46, No.10 (2006) 773-780.
 - 25) HIROSE, A., XIAO, C., MITARAI, O., et al., Physics in Canada, (2006) 111.
 - 26) O. Mitarai, Y. Ding, M. Hubeny, Y. Lu, T. Onchi, D. McColl, C. Xiao and A. Hirose, "Plasma current sustainment after iron core saturation in the STOR-M tokamak", Fusion Engineering and Design, 89, (2014) 2467-2471.
 - 27) O. Mitarai, C. Xiao, et al., "Plasma current start-up by the outer ohmic coil in the STOR-M iron core tokamak" Review of Scientific Instruments (2015) 86, p033508- 033508-10.
 - 28) O. Mitarai, G. Tomney, E. Lewis, et al., "Plasma Current Start-up Experiments without Central Solenoid in the Iron Core STOR-M Tokamak", Nucl. Fusion 55 (2015) 063034 (11pp).
 5. TRIAM-Mトカマク
 - 29) 御手洗 修, 他 "TRIAM-1MトカマクにおけるCW 8. 2GHz低域混成波放射用ランチャーの設計", 九州大学応用力学研究所所報, 第66号, (1988年) 431.
 6. QUEST
 - 30) MITARAI Osamu , NAKAMURA Kazuo, ISHIGURO Masaki, HASEGAWA Makoto, IDEI Hiroshi, SAKAMOTO Mizuki, HANADA Kazuaki, ZUSHI Hideki, LIU Hai Qing, TASHIMA Saya, HIGASHIZONO Yuta, HIGASHIJIMA Aki, NAKASHIMA Hisatoshi, KAWASAKI Shoji, and QUEST group, "Plasma current ramp-up experiments in QUEST" APFA (2010), J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 (2010) p100—105.
 - 31) MITARAI Osamu, NAKAMURA Kazuo, TASHIMA Saya, HASEGAWA Makoto, IDEI Hiroshi, SAKAMOTO Mizuki, HANADA Kazuaki, ZUSHI Hideki, SATO Kohnosuke, ISHIGURO Masaki, LIU Hai Qing, HIGASHIZONO Yuta, HIGASHIJIMA Aki, NAKASHIMA Hisatoshi, KAWASAKI Shoji, TAKASE Yuichi, MAEKAWA Takashi, and NISHINO Nobuhiro, "First Ohmic Discharge assisted with RF power in QUEST Spherical Tokamak" Plasma and Fusion Research: Volume 6, 1402003 (2011).
 - 32) O. Mitarai, K. Nakamura, M. Hasegawa, T. Onchi, H. Idei, A. Fujisawa, K. Hanada, H. Zushi, A. Higashijima, H. Nakashima, S. Kawasaki, QUEST group , K. Matsuoka, S. Koike, T. Takahashi and H. Tsutsui, "Comparative studies of inner and outer divertor discharges and a fueling study in QUEST" Fusion Engineering and Design 109–111 (2016) 1365–1370.
 - 7.1 ACTカマク核融合炉
 - 33) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "AC Tokamak Reactor with Long Pulses", Fusion Technology, 15 (1989), 204.
 - 34) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "An Alternating Current Tokamak Reactor with Ohmic Ignition and Bootstrap Current", Fusion Technology, 20 (1991) 285-294.
 - 35) O. Mitarai, "AC Operation of a D-³He Tokamak Fusion Reactor", in 7th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, (Makuhari,

- Chiba, Japan, 1993).
- 7.2 核融合炉のイグニッションの研究
- 36) O. Mitarai, "Reduction of the "Ignition Barrier" by Spin Polarized Fusion Reactions", 原子核研究, (1986年9月号)59.
- 37) 御手洗 修, "核融合の必要条件とその温度, 密度分布及び偏極核融合依存性", 月刊「IONICS(アイオニクス)」=イオンの科学と技術=, (1987年8月号)17.
- 38) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Generalized Ignition Contour Map and Scaling Law Requirement For Reaching Ignition in a Tokamak Reactor", Nuclear Fusion, 28 (1988) 2141.
- 39) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Generalized Saddle Point Condition with Plasma Temperature and Density Profiles in a Tokamak Reactor", Fusion Technology, 16 (1989), 197.
- 40) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Ignition Access Condition Based on the Generalized Saddle Point in a Magnetic Fusion Reactor", Fusion Technology, 20 (1991), 208.
- 41) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Operation Path Method for Ignition Criterion in a D-T Tokamak Reactor", Fusion Technology, 22 (1992) 227-235.
- 42) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Ohmic Ignition in a Tokamak Reactor with a Confinement Degradation Effect Due to Alpha Heating", Fusion Technology, 23 (1993) 79-91.
- 43) MITARAI, O. and MURAOKA, K., "Ignition Analyses with ITER89P and ITER93HP Scalings for Burn Control and Diagnostics in ITER-ID", Plasma Physics & Controlled Fusion, 40 (1998) 1349-1372.
- 44) O. Mitarai and K. Muraoka, "Ignition Analyses for Burn Control and Diagnostics Developments in ITER", Nucl. Fusion, Vol. 37, No11 (1997) 1523-1540.
- 45) O. MITARAI and K. MURAOKA, "Ignition Analysis with the H-mode Power Threshold Scaling in a D-T Tokamak Reactor", Plasma Physics and Controlled Fusion, 38 (1996) 551-569.
- 46) O. Mitarai, H. Hasuyama and Y. Wakuta, "Spin Polarization Effect on Ignition Access Condition for D-T and D-³He Tokamak Fusion Reactors", Fusion Technology, 21 (1992) 2265-2283.
- 47) Osamu Mitarai, "Fuel Ratio and Fueling Control for Safe Ignited Operation in ITER class Tokamak Reactors", Advances in Plasma Physics Research, Vol. 2 (2002, 2) p37-74, Ed by G Francois, Nova Science Pub.
- 48) O. MITARAI, T. HONDA, T. NISHITANI and K. MURAOKA, "Comparative Studies of the dW/dt Effect in the Net Heating Power for Ignition Analyses", Fusion Engineering and Design, 55 (2001) 477-500.
- 49) MITARAI, O. and MURAOKA, K., "A Proposed Set of Diagnostics for Core Ignition Burn Control in a Tokamak Reactor", Nucl. Fusion, Vol. 39, No 6, (1999) 725-745.
- 50) 御手洗 修, 村岡克紀, "ITERの核融合燃焼制御と計測システム", プラズマ核融合学会誌(解説), Vol.75, No.6, 1999年6月, 717.
- 51) MITARAI, O. and MURAOKA, K., "Analyses of Diagnostic Failure Effect and Fail-Safe Ignited Operation in a Tokamak Fusion Reactor", Fusion Technology, 36 (1999) 194-211.
- 52) 大西正視, 岡本正雄, 御手洗 修, "1. 燃焼制御概論, 1. 2. アルファ加熱による熱的不安定性とその制御", プラズマ核融合学会誌(小特集, 磁場閉じ込め核融合プラズマの燃焼制御), Vol.75, No.12, 1999年12月, 1339-1345.
- 53) O. Mitarai, "Development of the Ignition Control Algorithm with Diagnostic Sets for an Inductive Operation in a Tokamak Reactor" in New Developments in Nuclear Fusion Research Editors: Y. Nakamura, Nova Science Pub. Date: 2006 ISBN: 1-59454-486-7) p.125-151.
- 7.3 ヘリカル炉のイグニッション
- 54) O. Mitarai, and S. Sudo, "Ignition Characteristics in D-T Helical Reactors", Fusion Technology, 27 (1995)377-388.
- 55) O. Mitarai, A. Sagara, and O. Motojima, "Ignition Access in the FFHR D-T Helical Reactor", J. of Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 1 (1998) 418-421.
- 56) O. Mitarai, A. Oda, A. Sagara, K. Yamazaki, and O. Motojima, "Pellet Injection Algorithm for the FFHR Helical Reactor" Fusion Engineering and Design 70 (2004) 247-267.
- 57) MITARAI Osamu, SAGARA Akio, IMAGAWA Shinsaku, TOMITA Yukihiro, WATANABE Kiyomasa and WATANABE Tsuguhiro, "Parameter

- Requirements for D-³He Helical Reactors”, *Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol. 6 (2004) p303-305.
- 58) Osamu MITARAI, Akio SAGARA, Nobuyoshi OHYABU, Ryuichi SAKAMOTO, Akio KOMORI and Osamu MOTOJIMA, “New Control Method of the Unstable Operating Point in the FFHR Helical Reactor”, *Plasma and Fusion Research, Rapid Communication*, Vol.2 (2007) 021-1-3.
- 59) O. Mitarai, A. Sagara, H. Chikaraishi, S. Imagawa, K. Watanabe, A.A. Shishkin and O. Motojima, “Minimization of the external heating power by long fusion power rise-up time for self-ignition access in the helical reactor FFHR2m”, *2007 Nucl. Fusion* 47 1411-1417.
- 60) MITARAI Osamu, SAGARA Akio, OHYABU Nobuyoshi, SAKAMOTO Ryuichi, KOMORI Akio, and MOTOJIMA Osamu, “Control Algorithm of the Unstable Operating Point in the FFHR Helical Reactor” *Fusion Science and Technology* 56 (2009) 1495.
- 61) O. Mitarai, A. Sagara, R. Sakamoto, N. Yanagi and T. Goto “Feedback control of the heating power to access the thermally unstable ignition regime in FFHR helical reactor” *Fusion Engineering and Design* 88 (2013) 1046–1049.
- 62) Hideaki MATSUURA, Osamu MITARAI1), Akio SAGARA2) and Yasuyuki NAKAO, “Alpha Particle Slowing-Down Characteristics and the Effect on MHD Instability Excitation at High-Density Operation Points in FFHRs”, *Plasma Fusion Res.* 6, 2405086 (2011).
- 63) O. Mitarai, A. Sagara, N. Ashikawa, R. Sakamoto, M. Yoshinuma, M. Goto, T. Morisaki, T. Masuzaki, K. Ida, S. Morita, M. Osakabe, K. Tanaka, K. Nagaoka, N. Ohyabu, A. Komori, and O. Motojima “The low temperature and high density ignition in the helical reactor FFHR2m based on LHD experiments”, in 22nd IAEA Fusion Energy Conference, (13-8, Oct. 2008, Geneva, Switzerland) FT/P3-19.
- 64) O. Mitarai, A. Sagara, R. Sakamoto, N. Ohyabu, A. Komori, and O. Motojima, “High-density, low temperature ignited operations in FFHR”, Invited talk, in 18th Toki International Conference (ITC18) Development of Physics and Technology of Stellarator/Heliotrons en route to DEMO (Dec. 9-12, 2008, Ceratopia Toki, Gifu, Japan) *Plasma and Fusion Research Volume 5*, S1001 (2010).
- 65) O. Mitarai, A. Sagara, R. Sakamoto, N. Yanagi, T. Goto, S. Imagawa, O. Kaneko, and A. Komori “The high density ignition in FFHR helical reactor by neutral beam injection (NBI) heating” IAEA-FEC-FTP/P6-19 (2010, Daejeon).
- 66) O. Mitarai, A. Sagara, R. Sakamoto, N. Yanagi and T. Goto “Feedback control of the heating power to access the thermally unstable ignition regime in FFHR helical reactor” *Fusion Engineering and Design* 88 (2013) 1046–1049.
- 67) O. Mitarai, A. Sagara, R. Sakamoto, “Control concept for the high density and low temperature ignition in the FFHR helical reactor”, *Fusion Energy and Power: Applications, Technologies and Challenges* (2015) Nova publication.
- 7.4 垂直磁場によるプラズマ電流ランプアップ
- 68) O. MITARAI, “Inductive Plasma Current Start-up by the Outer Vertical Field Coil in a Spherical Tokamak” *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 41 (1999) 1469-1483.
- 69) O. Mitarai, R. Yoshino, et al., “Plasma current ramp-up assisted by outer vertical field coils in a high aspect ratio tokamak”, *Nucl. Fusion*, 10 (2002) 1257.
- 70) SHIRAIWA, S., IDE, S., ITOH, S., MITARAI, O., et al., *Physical Rev. Lett.* Vol.92, (2003) 35001-1-4.
- 71) O. Mitarai and Y. Takase, “Plasma Current Ramp-up by the Outer Vertical Field Coils in a Spherical Tokamak Reactor”, *Fusion Science and Technology*, Vol.43, No. 1 (2003) p67-90.
- 72) O. Mitarai, et al., “Plasma Current Start-up by ECW and Vertical Field in the TST-2 Spherical Tokamak” *Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol. 80 No.07 (2004) p549-550.
- 73) Y-K Peng, P.J. Fogarty, T.W. Burgess, D. J. Strickler, B. E. Nelson, J. Tsai, C.A. Neumeyer, R. Bell, C. Kessel, J. Menard, D. Gates, B. LeBlanc, D. Mikkelsen, E. Fredrickson, L. Grisham, J. Schmidt, P. Rutherford, S. Sabbagh, A. Field, A. Sykes, I. Cook, O. Mitarai, Y. Takase, “Component test facility based on the spherical tokamak”, *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 47 (2005) B263-B283.
- 74) Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Adachi, N. Ishii, H. Kasahara, H. Nuga, Y. Ono, T. Oosako, M.

- Sasaki, Y. Shimada, N. Sumitomo, I. Taguchi, H. Tojo, J. Tsujimura, M. Ushigome, T. Yamada, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Idei, K. Nakamura, M. Sakamoto, K. Sasaki, K.N. Sato, H. Zushi, N. Nishino and O. Mitarai, "Plasma current start-up experiments without the central solenoid in the TST-2 spherical tokamak", Nucl. Fusion 46 No 8 (August 2006) S598-S602.
- 75) M. Ushigome, S. Ide, S. Itoh, E. Jotaki, O. Mitarai, S. Shiraiwa, T. Suzuki, Y. Takase, S. Tanaka, T. Fujita, P. Gohil, Y. Kamada, L. Lao, T. Luce, Y. Miura, O. Naito, T. Ozeki, P. Politzer, Y. Sakamoto and the JT-60 Team, "Development of completely solenoidless tokamak operation in JT-60U", Nucl. Fusion 46 No 2 (February 2006) 207-213.
- 76) 御手洗 修, チャールズ・ケッセル, 広瀬 章「スフェリカルトカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ」電気学会, 巻/号/部門 Vol. 129/No. 9/Sec. A (2009) p605-608.
- 7.5 D-³He核融合炉のイグニッション
- 77) 御手洗 修, "D-³Heトカマク核融合炉における”峠の条件”とその偏極核融合依存性”, 月刊「IONIC S(アイオニクス)」=イオンの科学と技術=, (1988年10月号)15.
- 78) O. Mitarai, A. Hirose and H.M. Skarsgard, "Saddle Point Condition for D-³He Tokamak Fusion Reactor", Fusion Technology, 19 (1991), 234-250. (March, No.2).
- 79) O. Mitarai, "D-³He Tokamak Reactor with Inductive Alternating Current and Uni-Directional Current Operation", Fusion Engineering and Design, 26 (1995) 605-617.
- 80) O. Mitarai, H. Matsuura and Y. Tomita, "Aspect ratio dependencies of D-3He fueled tokamak reactors", Fusion Engineering and Design, Vol. 81, Issues 23-24, November 2006, Pages 2719-2724.
- 81) H. Matsuura, Y. Nakao, K. Kudo and O. Mitarai, "EFFECT OF NUCLEAR ELASTIC SCATTERING ON PLASMA CONFINEMENT CONDITION IN D-³He/TOKAMAK FUSION ENERGY SYSTEMS", 12th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES'2005) Brussels, Belgium, August 21-26, 2005, on CD-ROM, SCK•CEN, Mol, Belgium (2005)
- 82) Osamu MITARAI, "A D-³He spherical tokamak reactor with the plasma current ramp-up by vertical field" in "Nuclear Reactors, Nuclear Fusion and Fusion Engineering", Nova Science Publishers, Inc. (2009), Edited by A. Aasen and P. Olsson.
- 83) Osamu Mitarai, Hideaki Matsuura, Takayuki Omori, Toshiki Takahashi, Shintarou Koike and Kazuo Nakamura, "Ignition Studies of D-³He Spherical Tokamak Reactor", ISFNT-13 (2017) Sep 25-29, Kyoto.