ガラストー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 ーー回想と展望ーー

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.

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 ガラストカマク,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、図面を引きはじめてみると、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、ブレークダウン、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カや 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 $B_t < 5kG$, 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 5.7x10⁻⁷ Torr (1976.12.18), 鉄心 の断面積は S= π (4.5 cm)²=63.6 cm², 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. 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、その上下は正方形状で、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,焼き鈍しをし 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 製アングルのうえ 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, 横から見たポロイダルコイルの 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トコアハイ



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 ターンループを用いてこれを積分して測定した.その結 果をリサジュー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

(Z)
2. 実驗装置
主半径 15.5cm,小半径 2.5cm の小型ト-ラス装置である。
(1)トロイグル磁場系
建磁場を得るためにコンデンり放電を利用するトロ1911破場 は、形動振をコイルにしてエポイン移動でモールト、にたパンケーキ型
111 (15900, 10) 11 2 111 とかわれた 1010 211
43,3上このゴルを御用工たはなりまたのの御はにもり155(13) 磁場も打消すためにを戻しコルを置いている、巻き戻しゴルを 法はる電流は磁場を作るのに用いた電流の方向を近しているたり
てある。してい近日を電気では、1000000000000000000000000000000000000
<u> </u>
бі 1%2Вт мах ≲ 5 kg ⊥эннф 5.3 ms
コンテンガ容量 2000p下(=200p下×10個並引) 之電電圧 *** SkV
<u> 高稽</u> エネルヤ wwx25k丁
程 1.6mm×5mm 総憲数 576卷(18×16×2)
32元 32元 (15元2列) 温度上母℃ (丁≤Joms)

図 4-1. 当時の資料



図 4-2. 当時の資料

ポロイダル磁場コイル系は一次巻き線と、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ーラスとした. 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,ガラス製のトー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 トーラス方向に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 5-2. 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.



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を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 に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たと 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、 ロゴスキーコイルや、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 ゴスキーコイルや、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. そのためのロゴ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.

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, 見知らぬに人に逢い, 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 オーマで考えられていた.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 でガラストーラス(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で外側に絶縁物がなかったの で,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ーラ 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、値段が高いので、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 ーしてもらうことで技術を習得した. 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ので,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ので,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. ここにロゴ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ゴスキーコイルも設 置した.これらのポ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,さらにガラステープを巻き,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で,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 行い,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った.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.実験は一人でできるように図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ー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ー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 を行うとどういう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4x10⁻⁸Torr, 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 3x10¹⁹m⁻³, 電子温度 T_e=200~300eV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 が. 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ぱしのプラズマを得 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(2x1018m-3/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(2x10¹⁸m⁻³/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ところである. 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. ブレー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 号のガラストーラスはお世辞にも美しいとはいえなかった ので、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 Ratsllaf, 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ッシャンら 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,この装置が気に入り,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 巻き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、特にトランジスター 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 Emmani 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, 通常のトカマク 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 1.5x10⁻⁴ Torr 程度に下げたらあっという間にループ電 圧の低いト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)はきれいなト 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 に多く付着してい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,やっと問題なくトカマク放電が得ら れるようになった.鉄心ト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.

私はより大きなトカマク装置で 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った. 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ので,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 がなくなり、しばらく共同研究はストップしてしまった.



First bank (positive) Second bank (negative) Third bank (Positive)

図 32. AC 運転用コンデンサー





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ィアに触発されて, 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.この新しいアイディア,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 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り たかったがかなわず,定年前になってやっと科研費 基盤研究(C)をいただいき,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 0H 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 一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)



C02=280 mFx36=10 F

100 V

2nd Bank

200V

3rd Bank

#253744, 253739 20 · lp-cori · lp-cori 15 l_b (kA) 10 5 (a) 0 -5 30 -VL (b) V (Volts) 20 10 0 -----IOH+0.0244 I_{oH}(kA) 4 -IOH+0 024 3 2 (c) n 0.15 0.15 0.05 -0.05 $\Phi^{-0.05}$ 0.1 (d) C-Flux-N-Int -0.1 -0.15 400 IVF (e) 200 vF(A) 0 -200 -400 20 30 0 10 40 Time(ms)

鉄心飽和中のプラズマ電流波形 図 37. (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

450 V

1st Bank



鉄心飽和実験用第3バンク

鉄心飽和時プラズマ電流駆動用第3バンク 図 40.

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,プラズマはディスラ プティブに停止している.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. SIOK-IM, SIOK-Mトカマクとの共同美練の歴 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 進歩は早くまた、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をする 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. 私が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 える. ガラストー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10²⁰m⁻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始めた.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、イグニション到達の目安 となるイグニ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 るために発明が産まれ、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しょと. 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ずであると考えた. 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,プ リンストンの著名な研究者からそんなことはないと批判さ

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

中性子発生の少ない,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も計算し てみたが,今までの実験データの範囲ではとうてい無理 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 どうかも計算した.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=6.7m, 小半径 a=4.2m, 楕円度 κ =2.8, 核融合出 力 P_f=3 GW, トロイダル磁場 B_t=4.0T, 閉じ込め増倍度 γ_{HH} =2.4~1.8(IPB98y2), イオン温度 T_i=120keV, 電子 温度 T_e=97keV, 電子密度 n(0)=1.97x10²⁰ m⁻³, ベータ 値 < β >~33%, プロトンや He 灰の閉じ込め時間比 τ_p*/τ_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 τ_p*/τ_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,このように高温度の D-³He 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-³He 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-³He 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-³He 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-³He 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-³He 核融合もどちらも可能である. 特に高 ベータのために D-³He 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-³He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

九大第一号機のトカマク(ガラストーラス)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, 九大第一号機のト 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遷移させ 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
- 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).
- 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
- 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.
- 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.
- 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.

- 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
- 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.
- 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 OUEST 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 ACトカマク核融合炉
- 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
- 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生",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, 231 (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 $D^{-3}He$ 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 MITARAII), 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, Daejon).
- 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. Schimidt, 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生", 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 CONDITIONIN 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.