

球状トカマク合体実験装置 UTST における初期プラズマ立ち上げ実験

学籍番号 66218 氏名 森井亮典
(指導教員 小野 靖 教授)

Key Words : Spherical Tokamak, UTST, high β , Double Null Merging

1 序論

球状トカマク合体実験装置 UTST は超高 β^{*1} 球状トカマク (以下 ST) を TS-3,4 装置や英国の MAST 装置等で実績ある合体法によって生成することを目的とした装置である。合体法は磁力線がつながり変わる際に電子が加速され数 MW の加熱パワーによって高 β な ST が得られる方法である。核融合炉の出力 P は重水素の密度

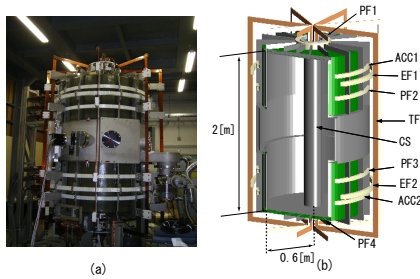


図 1 UTST の (a) 写真と (b) 概略図

n_D 、三重水素の密度 n_T 、反応断面積 $\langle \sigma v \rangle$ 、核融合反応で生成される中性子と α 粒子のエネルギー E 、トロイダル磁場 B_t 、真空容器容量 V を用いて次のように表される。

$$P = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E V \propto \beta^2 B_t^4 V \quad (1)$$

超伝導コイルを用いても B_t は 12~13[T] で限界であるので核融合炉出力を上げるためには β 値を上げなくてはならない。球状トカマクはその高円度な断面形状によって自然に β 値が高い配位となっている。また磁場による閉じ込め性能がよいということはコイル建造費を下げ経済性の良い炉設計が可能になるということでもある。

さらに UTST 装置の大きな特徴としてコイル群が真空容器外部にあるということが挙げられる。UTST 装置で ST を生成する方法は 2 つあり、1 つは 1.TF,EF,CS を使い CS コイル電流を振ることによる誘導電場でプラズマ電流を誘導する従来型トカマク装置と同様の方法と、もう 1 つが 2.PF,EF,TF (アシストとして CS) を用いるダブル・ヌル・マージング法 (以下 DNM 法) である。DNM 法は UTST 独自の方法でありこの方法による ST 生成を達成できれば、コイルを中性子の発生する真空容器内部に配置することが現実的でない商用核融

合炉に近い条件下でのプラズマ生成を実証することができる。DNM 法による超高 β ST 生成シナリオを図 2 に示す 本研究ではこの DNM 法に CS コイルのアシスト

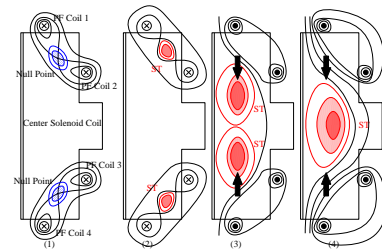


図 2 Double Null Merging(1)2 つの磁気中性点を形成し, (2) そこで ST を成長させ,(3) 中央で合体し,(4) 超高 β ST を形成する

を加えて初期プラズマの生成を行った。

2 CS コイルの立ち上げ

CS コイルによるプラズマ電流誘導の原理を図 3 に示す。この原理は CS コイルを変圧器の 1 次側、プラズマを 2 次側とするとわかりやすい。

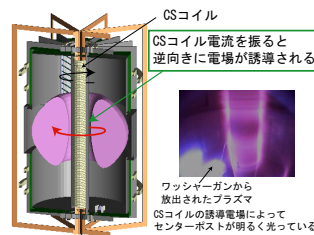


図 3 CS コイルによるアシストの原理

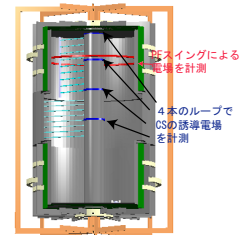


図 4 フラックスループによる計測

CS コイルに通電するタイミングを決定するために、CS コイルの誘導電場の時間変化と PF コイルの誘導電場の時間変化をそれぞれ図 4 のように配置したフラックスループで計測した。結果をそれぞれ図 5 と図 6 に示す。PF スイング^{*2} の誘導電場のピークは放電から 600[μ s] 後に訪れる。CS の誘導電場は放電から約 200[μ s] 後に訪れるので CS 放電のタイミングを PF 放電から 400[μ s] 後に決定した。

3 CS 補助による初期プラズマ生成実験

CS 補助有りで行ったところプラズマ電流が 120[kA] 級の初期プラズマ生成を達成した。(ただし

^{*1} β 値はプラズマの熱圧力をそれを閉じ込める磁気圧で割った値である。1 に近いほど効率の良い閉じ込めであることをあらわし経済性の指標ともなる

^{*2} PF フラックススイング (以下 PF スイングと略)

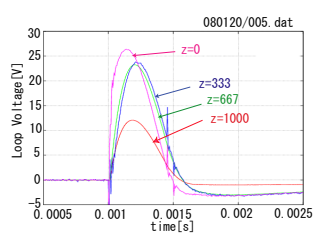


図 5 CS コイルがセンターポスト付近で誘導する電場

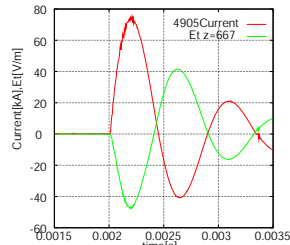


図 6 PF スイミングで壁際に誘導される電場 (緑線)

合体までは確認できなかったので正確には DNM 法とは呼べない) 図 7 に放電シーケンス、図 8 に計測されたプラズマ電流を CS 無しの場合と並べて示す。プラズ

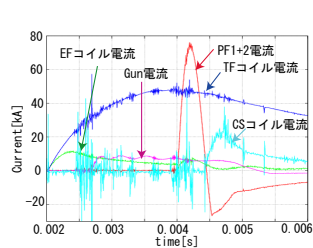


図 7 放電シーケンス

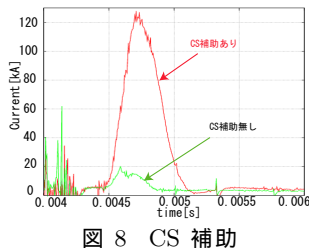


図 8 CS 補助有り無しでのプラズマ電流比較

マ電流は真空容器内部に設置したロゴスキークoilで計測した。図 9 を見ると 4600[μs] の赤丸の部分で 2 つのトラスプラズマが出来て 4700[μs] でちょうどプラズマが中央に押し出されようとしている様子 (青丸) を見ることができた。

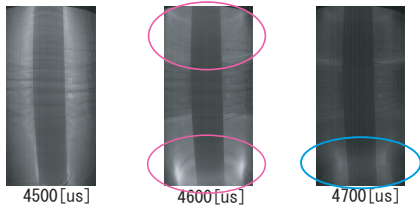


図 9 時刻 4500[μs], 4600[μs], 4700[μs] での写真

4 CS 無しでのプラズマ生成のための PF 電源改造

タウンゼントによるとブレイクダウンに必要な最低電界 E_{min} は

$$E_{min} = \frac{BP}{\log(APL)} \quad (2)$$

と表すことが出来る。(H₂ では $A=500, B=13000, P$ はガス圧, L は連結長) 連結長 L は磁力線に沿って壁と衝突するまでの距離と定義され $L \approx a_{eff} \times B_t/B_z$ と見積もられる。(a_{eff} は壁までの実効距離) 式 (2) に値を代入して L を変化させてプロットすると図 10 となる。CS の有無でプラズマが点いたり消えたりすることを考慮して見積もった L は ~5[m] である。磁気プローブの計測値を用いて定義式から磁気中性点での連結長を見積もったところ 5.1[m] となりほぼ等しい結果を得た。また図 11 にブレイクダウンにかかる時間についてもプロットした。これは連結長中を加速する電子の平均速度

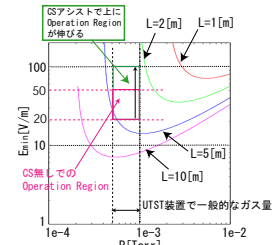


図 10 最小ブレイクダウン電界

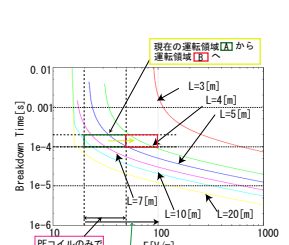


図 11 ブレイクダウン時間

がドリフト速度と一致するとして見積もった時間である。以上を考えると CS 無しでの立ち上げのために電場強度と維持時間を改善する必要があることがわかった。そこで両者を改善した PF 電源として PFN 回路の設計製作を行った。

図 12 に実際に製作した PFN 回路の回路図を示す。回路設計は L_1, L_2, L_3, C_2, C_3 を独立に変えながら電流フラット維持時間 400[μs], 電流立下り時間 300[μs] の波形がシミュレーションで得られるまで何度も繰り返し最適化を図った。その後実際に回路を組み放電実験を行った。その結果を図 14 と図 15 に示す。

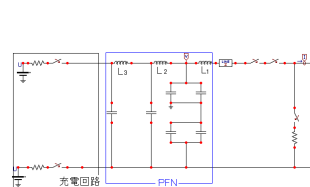


図 12 設計した PFN 回路図

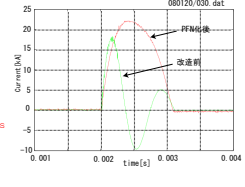


図 13 PFN 化前後でのコイル電流比較

実際の電流波形はシミュレーション結果よりも冗長でフラットトップ維持時間 300[μs], 立下り時間 400[μs] であった。(図 13) 磁束の染み込みを第 1 ピークで比較すると 1.6 倍に (図 14) 電場の維持時間を第 1 ピーク付近で比べると約 2 倍に改善することができた。現在は充電回路のトラブルで電流反転が実現できていないが、電流反転さえ実現できれば CS 無しでの運転も視野に入る運転領域に到達できそうである。

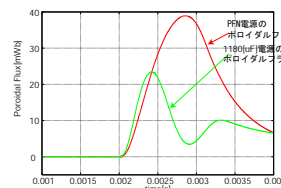


図 14 現在の電源と PFN 電源が作る磁束を図 4 の赤いループで計測

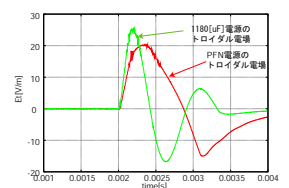


図 15 現在の電源と PFN 電場が壁際に作る電場を図 4 の赤いループで計測

5 まとめと今後の展望

本研究で CS コイルの立ち上げを行い、その補助のもとプラズマ電流 120[kA] 級の初期プラズマ生成を達成した。次の段階として CS レスでの運転を目指しフラックスの染み込みを 1.6 倍、電場の維持時間を 2 倍に改善した PFN 回路の設計製作を完了した。今後は充電回路を改造し PFN 回路で電流反転を実現し CS レスでの運転を目指す。