

効率的実験運転に向けた JT-60 放電周期管理機能の開発

高野正二、戸塚俊之、米川出

日本原子力研究所 那珂研究所 核融合装置試験部

1 はじめに

トカマク型核融合試験装置 JT-60 (図 1) の運転においては、受電電力量やトロイダル磁場コイル(TFC)絶縁材の最高許容温度の制約があり、運転員の監視業務の負担となっていた。その状況を改善し実験の効率化を図るために制約条件を計算機に組み入れた放電周期管理を行い、最短周期で実験運転を実施して来た。

昨年、プラズマ放電時間を 15 秒から 65 秒に延伸する改造に伴い、プラズマを生成、制御するためのポロイダル磁場コイル (PFC) 電源では、設計限界値に近い熱負荷で運転を実施することになり、装置保全上、放電周期管理をより強化することが要請された。そこで、新たに PFC 導体及び電源の熱負荷の制約条件を加えた放電周期管理機能を開発した。

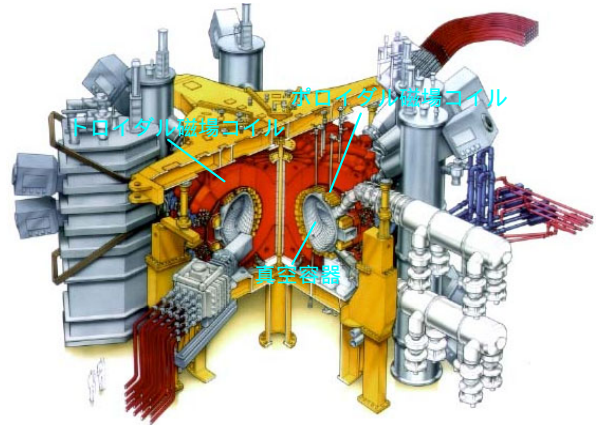


図 1. JT-60 鳥瞰図

2 開発の目的

プラズマ放電時間の延伸に伴い、TFC 絶縁材の温度、PFC 導体およびその電源系の熱負荷の管理が機器の安全上重要である。従って、熱負荷による温度上昇と冷却時間のバランスを図り、最適な放電周期を決定するソフトウェア機能を組み込むこととした。

考慮すべき全ての放電周期決定因子は、以下の 3 項目である。

受電電力

30 分間の平均受電電力が制限値 40MW を超えてはならない。これは、運転への具体的制約として「連続する 3 回の放電において、1 度でもトロイダル磁場が 3.16T を超える場合は、30 分間に 3 回の放電を実施しないようにする。」となる。

TFC 絶縁材の温度

TFC 絶縁材の温度が最高許容温度 (152) を超えないよう、次回予定されている TFC 通電電流波形から求めた熱負荷による温度上昇分を差し引いた温度以下に、放電開始時の段階で TFC 温度が下がっていること。

PFC 電源の熱負荷

PFC 電源を構成する 5 電源のうち、熱負荷の観点から実験運転の放電周期を決める電源は、F 電源 (プラズマ電流を発生させ制御する空心変流器コイルの電源)、Q 電源 (高三角度プラズマの生成・制御を行うコイルの電源) および M 電源 (不純物の除去などを行うダイバーター配位を形成するためのコイルの電源) である。そこで、F 電源、Q 電源、M 電源の熱負荷の制限値である矩形波換算通電時間 (ある電源に定格電流を印加した場合の通電可能な最大時間として熱エネルギーを表現する) と、放電周期の関

係を示す制限値に従って、放電周期を管理する。(表1)
 放電周期管理機能は、上記3項目の制約条件を厳格に守り、最短の周期で放電を行い、効率的実験運転を実現することを目的とする。

表 1. 矩形波換算通電時間最大値

放電周期	12分	15分	20分	25分	30分
F電源 (定格電流120KA)	4.7s	7.0s	9.2s	10.0s	
Q電源 (定格電流50KA)	3.7s	4.9s	6.0s		7.6s
M電源 (定格電流110KA)	6.5s		7.8s		

3 放電周期管理機能の概要

実験運転は、放電時の各設備の運転パラメータ(例えば、ガス注入量、トロイダル磁場コイル電流値等およびプラズマパラメータ等)を規定する「放電条件」を設定し、その確定という一連の準備操作を行うことにより、プラズマ放電シーケンス(図2)を、開始待ち状態にするところから始まる。この放電シーケンス開始待ち状態になると、放電周期管理機能を動作させる。この放電周期管理機能は、受電電力を管理する「30分デマンド管理機能」とTFCの温度を管理する「TFC温度管理機能」および「PFC電源熱負荷管理機能」を加えた3つの機能で構成する(図3)。放電周期管理機能は、それぞれの機能毎に条件を満たす待ち時間を算出し、その結果から最も大きい待ち時間を運転員に通知する。具体的には以下の4ステップからなる。前回までの放電の実績を入力。今回の放電のトロイダル磁場強度およびF、Q、M電源の矩形波換算通電時間を用いて、放電開始のTFC温度および必要なF、Q、M電源冷却時間を算出する。今回の放電が開始可能となる時刻を計算し、その待ち時間を運転員に通知する。と同時に、それまで放電シーケンス開始を遅らせる。

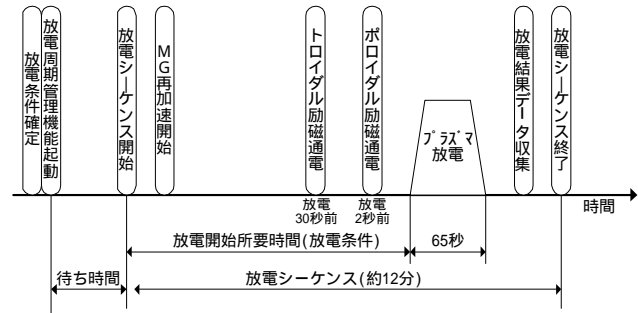


図 2. 放電シーケンス図

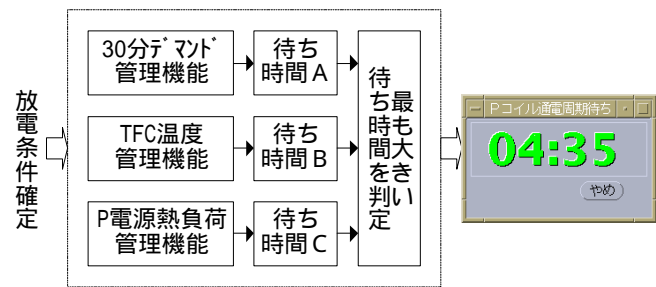


図 3. 放電周期管理機能の構成

以下に各機能の待ち時間の算出方法について記述する。

(1) 30分デマンド管理機能

30分デマンド管理機能は、過去の2ショットと今回の計3放電において、トロイダル磁場(BT)が3.16Tを超える場合に、前々回の放電開始時刻から30分以上の放電間隔となる様に、シーケンス開始までの待ち時間Wを次の式に従って求めるものである。

$$W = (\text{前々回の放電開始時刻} + 30 \text{分}) - (\text{現在時刻} + \text{放電開始所要時間[分]}) \quad [\text{分}]$$

図4に示す例では、前回放電のトロイダル磁場が3.16Tであり、放電開始所要時間は放電条件から6分が与えられる。従って、前々回放電開始時刻から22分後に放電条件の確定を行うと、待ち時間は2分と計算さ

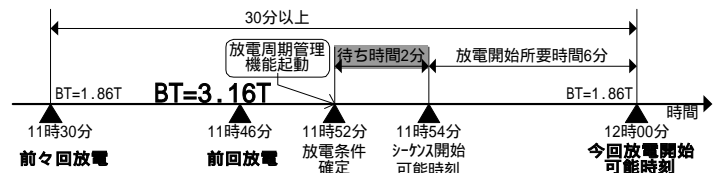


図 4. 30 デマンド管理機能の具体例

れる。尚、トロイダル磁場が 3.16T 以下の場合、この機能は動作しない。

(2) TFC 温度管理機能

JT-60 では、TFC 健全性確認のため温度監視装置を導入して TFC の温度を常時監視している。TFC 温度管理機能は、放電条件確定時に求められた放電 1 分前の TFC の許容温度を、TFC 温度監視装置に送信し、許容温度に到達するまでの冷却時間 (S) を受信して今回のシーケンス開始が可能となるまでの待ち時間を次式に従って求めるものである。

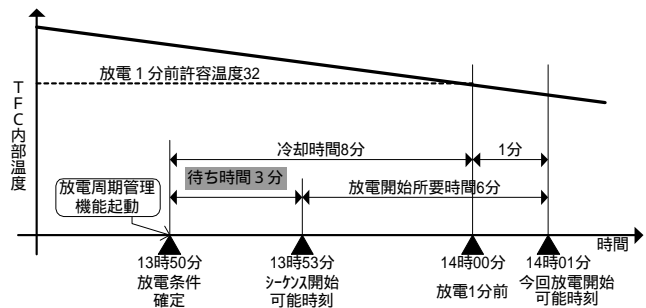


図 5. TFC 温度管理機能の具体例

$$W = S + 1 - (\text{放電開始所要時間}) [\text{分}]$$

図 5 に示す例では、放電条件確定時に求めた放電 1 分前許容温度到達までの冷却時間が 8 分であり、放電条件から与えられた放電開始所要時間 6 分を用いて計算すると待ち時間は 3 分となる。

(3) PFC 電源熱負荷管理機能

PFC 電源の熱負荷管理機能は、F 電源、Q 電源、M 電源の中で最も長い冷却時間 (S_{MAX}) を用いて、放電開始可能時刻を計算し、シーケンス開始が可能となるまでの待ち時間 W を次式に従って求めるものである。

$$W = (\text{前回放電開始時刻} + S_{MAX}) - (\text{現在時刻} + \text{放電開始所要時間}) [\text{分}]$$

F、Q、M 電源の冷却時間 S_F と S_Q および S_M は、放電周期と矩形波換算通電時間の関係 (表 1 参照) を表す次式に従って計算する。

H = 矩形波換算通電時間 [秒] として、

$$S_F = 0.0359H_F^3 - 0.479H_F^2 + 3.642H_F [\text{分}] \quad (\text{近似式})$$

$$S_Q = 0.0644H_Q^3 - 0.35568H_Q^2 + 3.6145H_Q [\text{分}] \quad (\text{近似式})$$

$$S_M = 6.1538H_M - 28 [\text{分}] \quad (\text{近似式})$$

但し、放電シーケンス所要時間の最小値は約 12 分なので、最小冷却時間は 12 分とする。

矩形波換算通電時間の計算においては、前回の放電において同じ熱負荷の放電を実施した場合でも、次に実施する放電の熱負荷の大小によって必要な冷却時間が変動するため、上記の冷却時間を求める計算式に使用する矩形波換算通電時間は、前回放電の矩形波換算通電時間と今回の放電条件で設定された矩形波換算通電時間 (最大値) との平均値とする。

$$\text{平均矩形波換算通電時間} = (\text{前回放電矩形波換算通電時間} + \text{最大値}) / 2 [\text{秒}]$$

$$\text{矩形波換算通電時間} = (\text{電流}^2 \times \text{単位時間}) \text{の総和} / \text{定格電流}^2 [\text{秒}]$$

図 6 に示す例では、F、Q、M 電源の平均矩形波換算通電時間がそれぞれ 6.4 秒、5.3 秒、6.9 秒であり、冷却時間は 13 分 5 秒、18 分 45 秒、14 分 27 秒と計算される。また、放電開始所要時間は 6 分である。従って、前回の放電から 15 分後に放電条件の確定を行うと、待ち時間は最も長い冷却時間を要する M 電源の値 (18 分 45 秒) を用いて算出すると、3 分 45 秒となる。

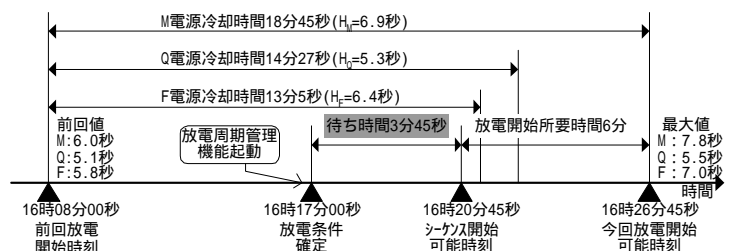


図 6. PFC 熱負荷管理機能の具体例

4 まとめ

表 2 に、JT-60 実験運転において確認された放電周期の実績値を示す。

ショット番号 E042965 においては、Q 電源の熱負荷を表す平均矩形波換算通電時間が 3.765 秒と計算され、これを用いて冷却時間を求めると 720.2 秒となり、放電開始可能時刻が 9 時 16 分 13 秒と計算される。このショットは、9 時 10 分 18 秒がシーケンス開始可能時刻（放電開始可能時刻 9 時 16 分 13 秒 - 放電開始所要時間 335 秒）であり、9 時 9 分 11 秒に放電条件が確定し、シーケンス開始待ち状態となったため、待ち時間が 67 秒と計算されたケースであり、正常な放電周期管理結果を示すものである。

本機能の開発により、JT-60 の実験運転では、運転員に負担を与えずに放電周期の制約を厳格に守り、機器の安全を保持し最短周期で実験運転を進行することが可能となった。

表 2. 放電周期実績値

ショット 番号	放電条件 確定時刻	放電開始 所要時間 [秒]	30分 デマンド 待ち時間 [秒]	TFC温度 監視 待ち時間 [秒]	PFC熱負荷				最大 待ち時間 [秒]	放電開始 可能時刻	シーケンス 開始時刻	放電開始 時刻		
					矩形波換算通電時間[秒]			冷却時間 [秒]					待ち時間 [秒]	
					前回値	今回値 (最大値)	平均値							
E042964	8:56:58	405	0	0	F	0.9	8.5	4.7	720	0	0	8:57:28	9:04:13	
					Q	0.7	4.9	2.8	720					
					M	0.6	6.5	3.55	720					
E042965	9:09:11	355	0	0	F	0.86	8.5	4.68	720	67	67	9:16:13	9:15:16	9:16:26
					Q	2.63	4.9	3.765	720.2					
					M	0.71	6.5	3.605	720					
E042966	9:24:59	405	0	0	F	0.1	8.5	4.3	720	0	0	9:28:26	9:31:44	9:35:01
					Q	0.0	4.9	2.45	720					
					M	0.0	6.5	3.25	720					
E042967	9:51:18	355	0	0	F	0.51	8.5	4.505	720	0	0	9:41:06	9:41:33	9:47:28
					Q	0.21	4.9	2.555	720					
					M	0.38	6.5	3.44	720					
E042968	10:09:02	405	0	0	F	0.9	8.5	4.7	720	0	0	10:13:23	9:54:38	10:01:23
					Q	0.7	4.9	5.6	720					
					M	0.7	6.5	3.6	720					

朝一番のショットのため、放電開始可能時刻の制限なし。