

JT-60NBI 装置の長パルス運転

薄井勝富、山本巧、大賀徳道、河合視己人、本田敦、菊池勝美、能登勝也、大島克己

日本原子力研究所 那珂研究所

1. はじめに

JT-60の長時間放電実験に向けて、正イオンNBI装置のビームパルス幅を最大30秒に伸長することとした。正イオンNBI装置の1ユニットあたりの最大定格入射パワーおよび最大定格パルス幅は、2.85MW、10秒であるが、これを必要最小限の改造および調整にて、また、極力パワーを落とすことなくパルス幅を伸長することとして設計検討および主要機器の通電試験を実施した。

設計検討では、主に各構成機器の30秒通電時における温度上昇を計算し最大使用可能範囲を推定した。その結果、加速電源および減速電源のGTOゲートユニットの改造、加速電源の電圧制御用真空管駆動回路の改造および運転時間超過検出用タイマー設定値変更を行うことにより、加速電圧85kV、ビームパルス幅30秒、繰り返し率1/30までの運転が可能であることが分かった。

また、正イオンNBI装置14ユニットのうちの1ユニットにおいて、他のユニットに先行して上記の改造を行い、模擬負荷抵抗器を接続して通電試験を実施した。各電源の抵抗器およびケーブル等の温度上昇を測定し、設計検討で予測した使用範囲内であることを確認した。現在、JT-60プラズマへの長パルスビーム入射による加熱実験中である。

2. 30秒化の検討

まず、始めにビームパルス幅を30秒に伸長する上での、入射パワーの目標値を過去の運転実績およびプラズマ加熱実験からの要求により1ユニットあたり2MWとし、この条件を満たすため各電源の30秒化後の目標性能を決定した。その結果を表1に示す。

表1. 改造前後の性能比較

電源	基本性能			30秒化後の目標性能		
	電圧	電流	パルス幅	電圧	電流	パルス幅
加速	120kV	94A	10s	85kV	55A	30s
減速	2kV	20A	10s	2kV	3A	30s
アーク A,B	120V	1200A	11s	70V	700A	31s
フィラメント A,B	15V	300A×8	16s	13V	210A×8	36s
偏向コイル	90V	2300A	13s	70V	1900A	33s
打消コイル	160V	1200A	13s	50V	500A	33s

2.1 I^2t と V^2t の比較

表2に、表1を基に計算した各電源の30秒化後の目標性能と定格10秒通電時に対する責務を示す。30秒化後においては、特に並列接続機器の責務が大きいことが分かる。

なお、減速電源については、 V^2t の比が3倍になることから、主回路に並列に接続されているダミー抵抗器

の容量を 270W から 1080W に増加することとした。その他の電源については、制御回路の改造にとどめることとした。

表 2. I^2t と V^2t の比較

電源	加速	減速	アーク	フィラメント	偏向コイル	打消コイル
I^2t	1.03	0.07	0.96	1.10	1.55	0.44
V^2t	1.51	3.00	0.96	1.69	1.54	0.25

2.2 抵抗器の温度上昇予測

各電源の 30 秒化においては、特に並列機器の責務が大きい。ここでは加速電源ダミー抵抗器 (R-A5)、減速電源ダミー抵抗器 (R-D4) およびフィラメント電源ダミー抵抗器 (R510B) に着目して、10 秒と 30 秒通電時の抵抗器の温度上昇を予測した。結果を以下に示す。各機器の最大使用温度は 100 以内を目標とする。印の値は 30 秒化後の運転パラメータにおける温度上昇値である。

(1) 加速電源ダミー抵抗器の温度上昇

R-A5:42k -100W 370k (44S-5P) 22kW ER100AS 東海高熱工業製

加速電圧(kV)	120	110	100	90	85	80	70
10 秒通電時温度上昇()	34.60	29.07	24.03	19.46	17.36	15.38	11.77
30 秒通電時温度上昇()	58.25	48.94	40.45	32.76	29.22	25.89	19.82

Duty は 1/30 とする。なお、ER100AS の最高使用温度は 250 である。

(2) 減速電源ダミー抵抗器の温度上昇

R-D4:20k -270W 5k (1S-4P) 1080W ER270AS 東海高熱工業製

減速電圧(kV)	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4
10 秒通電時温度上昇()	10.97	9.90	8.88	7.92	7.02	6.17	5.37
30 秒通電時温度上昇()	15.32	13.83	12.41	11.07	9.81	8.62	7.51

Duty は 1/30 とする。なお、ER270AS の最高使用温度は 250 である。

(3) フィラメント電源ダミー抵抗器の温度上昇

R510B:20 -180W 10 (2P) 360W RF250 進和製作所製

フィラメント電圧(V)	15	14	13	12	11	10
10 秒通電時温度上昇()	0.94	0.82	0.71	0.60	0.51	0.42
30 秒通電時温度上昇()	1.49	1.30	1.12	0.95	0.80	0.66

Duty は 1/30 とする。なお、RF250 の最高使用温度は 350 である。

上記の結果、周囲温度を 40 としても最大で加速電源のダミー抵抗器が約 70 と予想され充分運転領域内にあることが確認できた。

3. 通電試験

通電試験は、正イオン NBI 装置 14 ユニットのうちの 1 ユニットについて実施した。

加速電源および減速電源では、無負荷 30 秒通電を行い、ダミー抵抗器等の温度上昇を放射温度計とサーモラベルの変化により測定した。また、フィラメント電源については、無負荷 31 秒通電および模擬負荷抵抗器による 30 秒通電を実施した。

(1) 加速電源

ダミー抵抗器 R-A5 における測定結果を図 1. に示す。Duty は 1/30 とした。試験電圧は、加速電圧 84kV に

において「水冷抵抗器過負荷」が発生したため、70kV で実施し 10 ショット連続して通電した。「水冷抵抗器過負荷」は、定格運転時における本抵抗器への流入電流と通電時間(I^2t)にて管理されていたためである。なお、同時にサーモラベルにより、R-A5 以外のサイリスタスイッチ QSW 素子および直流リアクトル DCL 等の温度を測定した。

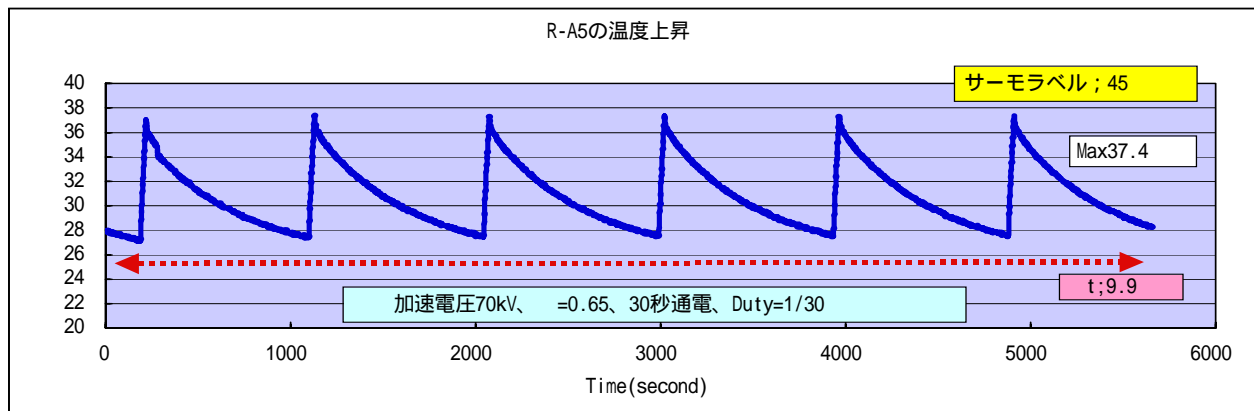


図1. ダミー抵抗器 R-A5 の温度上昇

上記の結果、ダミー抵抗器 R-A5 の最高温度は放射温度計では 37.4 、サーモラベルでは約 45 であった。70kV、30 秒通電では 19.82 の温度上昇と予測したが、室温 24 を考慮するとサーモラベルでは約 21 、放射温度計では 13.4 の温度上昇であることが分かった。いずれにしても計算予測とは大きな相違は無い。なお、R-A5 以外の機器においても目だった温度変化はなかった。よって、水冷抵抗器を除く並列機器の 30 秒通電は充分可能と判断した。また、水冷抵抗器については、通電試験による温度上昇測定ができないため、温度上昇計算により検討し 30 秒通電では、最大定格の約 80% の熱負荷であることを確認した。

(2)減速電源

無負荷 30 秒通電を-2kV にて、5 ショット実施した。放射温度計での測定は、ダミー抵抗器 R-D4 とし、同時にサーモラベルでも測定した。結果を図 2. に示す。また、これに併せて整流器 RF-D および直流リアクトル DCL-D 等をサーモラベルで測定した。

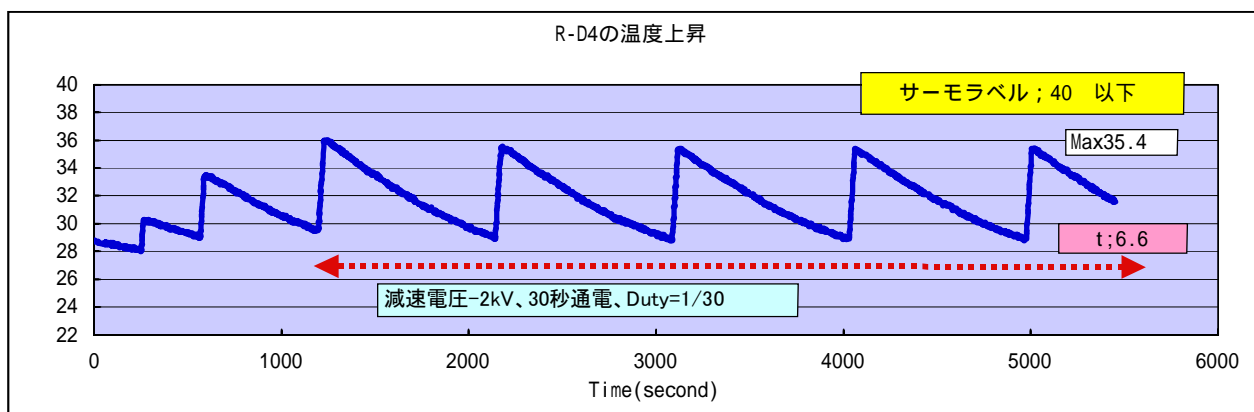


図2. ダミー抵抗器 R-D4 の温度上昇

上記の結果、ダミー抵抗器 R-D4 の放射温度計による測定では最高温度 35.4 、サーモラベルでは 40 以下であった。よって、温度上昇は、室温 24 とすると 11.4 となり、温度上昇予測は 15.32 であったことから、実測値の方がやや小さめのであるけれども、大きな相違は無いと判断し、その他の機器についても目だった温度変化はなかったことから、30 秒通電は充分可能と判断した。

(3)フィラメント電源

フィラメント電源では無負荷通電試験と模擬負荷を用いた通電試験を実施した。無負荷通電試験では、最

初に定格相当である 15.4V、16 秒、3 ショット実施し、その後 31 秒の通電を行った。結果を図 3. に示す。フィラメント電源では、本来ならばビームパルス幅 30 秒の場合、フィラメントの予熱のため 36 秒通電となるが、ここではマニュアル設定器の都合上、31 秒とした。放射温度計での測定結果、最高温度は 16 秒通電で 24.5、31 秒通電で 24.7 であり、温度上昇も両者ともに約 1 と極めて小さかった。また、その他の機器についても目だった温度変化はなかったことから、30 秒通電は充分可能と判断した。

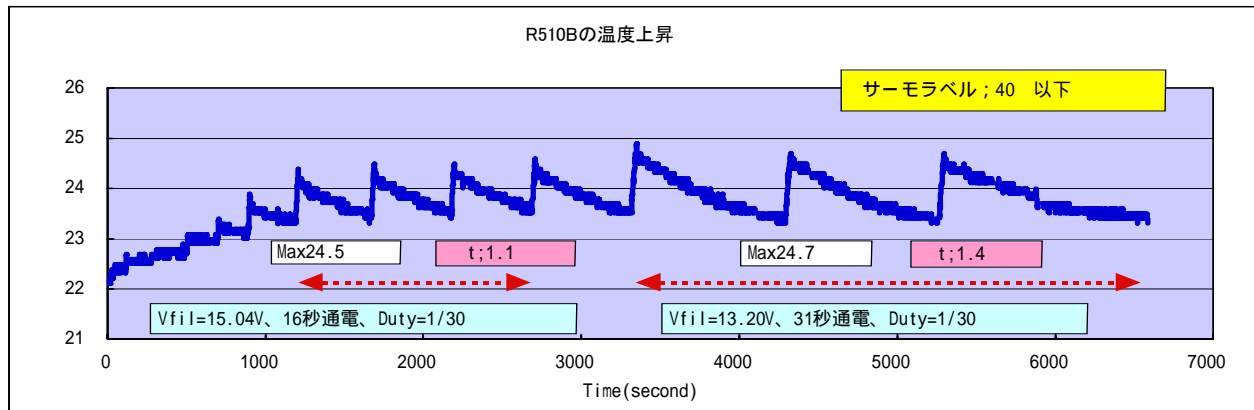


図 3. ダミー抵抗器 R510B の温度上昇

その後、模擬負荷抵抗器通電試験を 15.2V、198A、30 秒、5 ショット実施した。本来であれば電流値を 30 秒化後の目標値である 210A とするべきところであったが、SF6 ガスダクト内のケーブルにおける電圧降下により 13V、210A を設定することは困難であることが分り、上記の値とした。温度測定は、無負荷通電時と同じポイントで行った。結果は、特に大きな変化は見られなかった。

また、これと同時に通電前後にフィラメント出力ケーブルの抵抗値をダブルブリッジにて測定し、その抵抗値変化からケーブルの温度上昇を求めた。これら電源の出力ケーブルは、各ユニット毎に設けられている SF6 ガスダクト内に収められている。このケーブルの温度上昇の測定も 30 秒通電する上で重要な確認項目である。測定結果は、室温 26 において、ケーブルの温度は約 38~39 と求められ、ケーブル全体の平均温度上昇は約 12 と推定された。ヒートスポットを+15 としてもケーブルの最高温度は約 65 と考えられる。なお、フィラメント出力ケーブルには、600VEP150sq ケーブルが使用されており、最高使用温度は 90 である。従って、フィラメント電源単独では 30 秒通電でも特に問題はないと思われる。ただし、実際の 30 秒通電時にはこの他にアーク電源も同期して通電されることも考慮しなければならないが、アーク電源によるケーブルの温度上昇は約 5 と見積もられることから大きな問題とはならないと考えられる。一方、フィラメント電源ケーブルの温度上昇予測計算では、150sq ケーブル 16 本、通電電流 260A/本、最大通電時間 36 秒、Duty1/30 において約 11 の温度上昇が確認されており結果はよく合っている。ちなみに、最大定格運転では約 25 の温度上昇であった。

4. まとめ

- (1)30 秒化の検討として、 I^2t と V^2t の比較から並列接続機器への責務が特に大きいことが分かった。これらを基に、各電源の並列接続機器である抵抗器の温度上昇を予測した。
- (2)通電試験では、放射温度計およびサーモラベルにて温度上昇を測定し、実測値と予測値を比較した。その結果、両者はほぼ同等であり主回路の大幅な改造をせずに、1 ユニットあたり 2MW、30 秒の通電が可能であることが分かった。
- (3)現在までの JT-60 長時間放電実験において、加速電圧 79.9kV、加速電流 53.0A、ビームパルス幅 26.29s、入射パワー 1.92MW (1 ユニットあたり) のビームを入射しており近日中に 30 秒入射を実施する計画である。