

100 秒入射に向けた負イオン中性粒子ビーム入射装置電源改造

○佐々木駿一、薄井勝富、菊池勝美、遠藤安栄、久保直也、河合視己人、花田磨砂也

日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所 JT-60NBI 開発グループ

1 はじめに

JT-60 の超伝導化装置である JT-60SA では、高い圧力のプラズマを定常に維持するために、負イオンを用いた中性粒子ビーム入射装置（以下、N-NBI 装置）のビームパルス幅を定格の 10 秒から 100 秒に延ばすことが要求されている。

この N-NBI 装置は、2つの負イオン源を有しており、1イオン源あたりの中性粒子ビーム入射パワーは 5 MW、ビームエネルギーは 500 keV である。この負イオン源は 3 段の静電加速器と負イオン生成部で構成されている。長パルス化改造に向けて、既存の短パルス用電源設備を最小限の改造することにより、100 秒間の長パルス運転を可能にすることが求められている。今回、N-NBI 電源設備の 100 秒化改造の検討を行った結果、加速電源に関しては、GTO インバータの出力制御方式の改造と、ブリーダ抵抗器の高抵抗化改造が必要であることが分かった。フィラメント電源は電源盤の大型化によるレイアウトの変更等の改造が必要であるが、その他の負イオン生成部の電源及び引出電源は、各電源の一部の構成機器を交換すれば 100 秒化が可能であることが分かった。

本稿では、ブリーダ抵抗器の改造方針を明確にするために実施した限界試験結果及び加速電源 GTO インバータ、負イオン生成部電源及び引出電源の 100 秒化改造検討結果について報告する。

2 N-NBI 用電源の構成

N-NBI 用電源は、定格 490 kV の加速電源と加速電位上の負イオン生成部電源とで構成される。図 1 に N-NBI 装置の電源構成図を示す。加速電源は、アークチャンバーで生成され引出電源により引出された負イオンを、500 keV まで加速するための電源で、18kV 受電系統から順に、電源の高速遮断を備えたコンバータ・インバータ、3 系統の昇圧変圧器と高圧整流器で構成され、3 段の加速電圧を発生させる。図 2 に加速電源の写真を示す。

負イオン生成部電源系統は、アークチャンバー内でソースプラズマを生成するためのフィラメント電源と

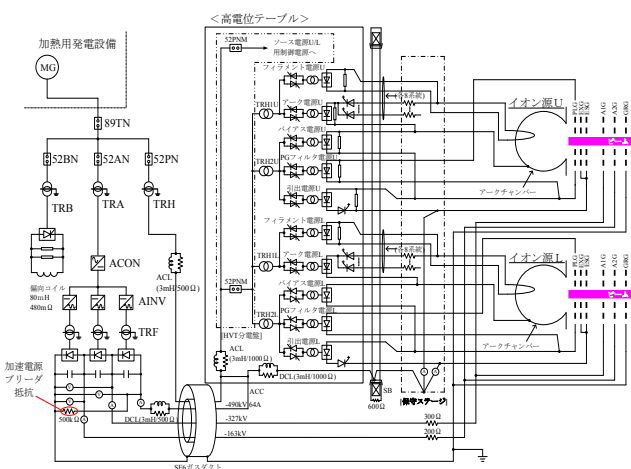


図 1. N-NBI 装置電源構成図

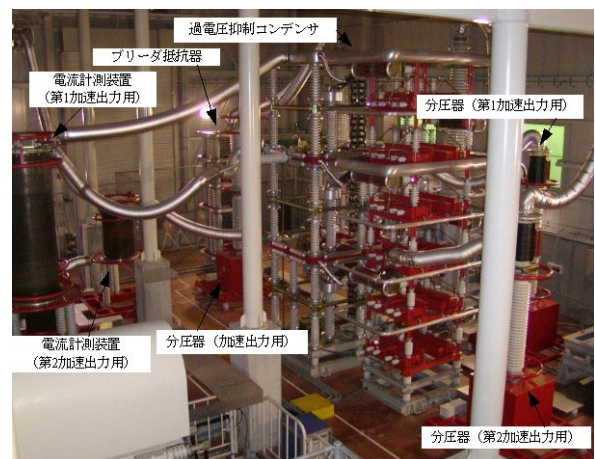


図 2. N-NBI 装置加速電源

アーク電源、負イオン生成に適した磁場配位を作る PG フィルター電源、ソースプラズマから負イオンビームを引出すための引出電源、ソースプラズマから引き出される電子の量を調整するためのバイアス電源で構成されている。負イオン生成部電源 5 系統の基本回路は、サイリスタ、変圧器、整流回路、GTO スイッチ（一部電源）から構成される DC パルス供給電源である。

3 100 秒化改造検討

N-NBI 装置の定格仕様は 10MW/10 秒であるが、JT-60U では入射パワーの上限値を～4MW に抑えてパルス幅を 30 秒まで延長して長時間入射を行った。それに対して、JT-60SA での 100 秒入射時の必要性能は定格 10 秒運転時と同様の 10MW、ビームエネルギー 500keV であり、繰返し率も現在の 1/60 から 1/30 に大きくする必要がある。表 1 に N-NBI 装置 100 秒運転時の各電源の要求性能を示す。

	10 秒時定格	100 秒時要求性能
Pinj×イオン源数	5MW×2sources	5MW×2sources
Duty Cycle	1/60	1/30
加速電源	-490kV,64A,10s	-490kV,64A,100s
フィラメント電源	15V,1200A×8,16s	13V,1000A×8,106s
アーク電源	120V,5000A,11s	150V,3500A,101s
バイアス電源	10V,1600A,11s	2V,500A,101s
PG フィルター電源	5V,10kA,11s	5.5V,6.6kA,101s
引出電源	-10kV,80A,10s	-10kV,80A,100s

表 2. N-NBI 装置 100 秒運転時の要求性能

N-NBI 装置の 100 秒化改造の検討は、本装置の運転実績を基に、長パルス運転時の各機器の温度上昇及び設計計算書の内容を評価し、各機器の健全性を段階的に確認した。この結果、加速電源は、従来の GTO インバータの単独制御方式から、既設 GTO インバータと新設 IEGT インバータとの組合せによる出力電圧制御方式に変更する改造と、加速電圧と接地間に設置されているブリーダ抵抗器の交換が必要であることが分かった。ブリーダ抵抗器については、30 秒間に延長した運転で既に定格相当となり、電力裕度は殆どないため、簡易的な冷却ファンの追加及びサーモラベルによる温度監視を実施した。100 秒運転に延長した場合には、抵抗体の温度耐性が無いため、容量を増加した新設の強制風冷型抵抗器に交換する必要がある。そこで、既存のブリーダ抵抗器の改造方針を明確にする目的で、限界性能試験を実施した。また、負イオン生成部電源及び引出電源については、100 秒運転時の各電源の構成機器の温度上昇を評価し、各機器の健全性を確認した。以下に今回実施した 100 秒化改造検討・試験結果を示す。

3.1 加速電源ブリーダ抵抗器の長パルス限界試験

3.1.1 加速電源ブリーダ抵抗器の役目

加速電源ブリーダ抵抗器は、負荷の投入/開放時の電圧変動を抑制するために、無負荷時にも微少のブリーダ電流を流すことで、加速電圧の安定制御を補償する回路である。図 3 に加速電源ブリーダ抵抗器の写真を示す。ブリーダ抵抗器は加速電源(490kV)と接地間に設置されており、定格 500kΩ, DC-500kV,1A,10 秒、Duty1/60 であり、抵抗器 1 本あたり 71.4kΩ,250W で 14 直列 10 並列の 5 段(計 700 本)で構成されている。



図 3. 加速電源ブリーダ抵抗器

3.1.2 加速電源用ブリーダ抵抗器の長パルス限界試験

ブリーダ抵抗器は、10 秒の定格で 1.4 倍の電力裕度で設計され、その後 30 秒までの時間延長の要求を受け、ブリーダ抵抗器側面に簡易的な冷却ファンを設置し、温度上昇の抑制を図った。

今回、ブリーダ抵抗器の限界性能試験を実施し、定格電圧でパルス延長した場合の温度上昇と 100 秒時要求性能である Duty1/30 を考慮した冷却ファンの冷却性能の評価を行い、コスト低減に繋がる改造設計の基礎データを取得した。

試験時は、温度上昇の大きい上段部を視野として、IR カメラの熱画像をリアルタイムで測定した。その IR カメラによる測定温度は、各段の代表的な位置のサーモラベルの温度と比較して差異は無い。また、抵抗器の熱計算に必要なファンによる冷却性能を評価するために、各段の風速を風速計で測定し、空気による熱伝達率の評価を行った。

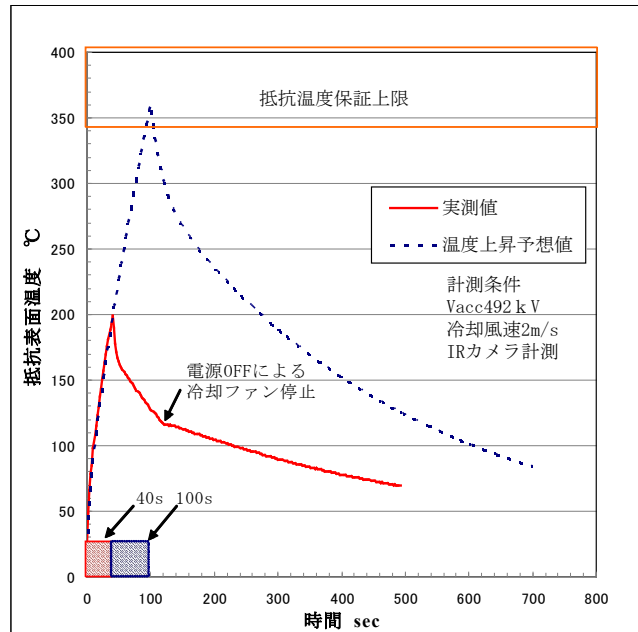


図 4. ブリーダ抵抗 40 秒実測と 100 秒の温度計算評価

限界性能試験は、抵抗器温度を監視しながら加速電圧通電時間を 5 秒から 5 秒ステップ毎に伸長した。その結果、40 秒で抵抗器温度が 200°C となった。図 4 にブリーダ抵抗 40 秒実測と 100 秒の温度計算評価グラフを示す。図 4 の赤線は、40 秒通電時の実測データを示す。青の波線は、抵抗器熱容量、入力エネルギー、空気による熱伝達を考慮に入れた計算結果である。40 秒通電実績を基に 100 秒通電を評価すると、抵抗器最高使用温度 340°C を超えてしまい、事前の検討結果のとおり、既存の抵抗器は使用できないことが確認された。

Duty1/30 の 100 秒繰返し通電に対する冷却効果については、ファンの冷却性能を基に熱計算により評価した結果、100 秒通電後に約 1500 秒で通電前のベース温度まで冷却される結果となった。

限界性能試験を基に検討した結果、ブリーダ抵抗器の 100 秒化改造は、全体の抵抗値を高くすることにより、入力エネルギーを低減させて温度上昇を抑制させる方針とした。抵抗値を現在の 2 倍の 142.8kΩ/個に高抵抗化し、全体の抵抗値を 1MΩ に改造する予定である。この改造の場合、高抵抗化に伴い、電圧制御の安定性の低下をどこまで許容できるか実運転で実証していく必要がある。また、上記の改造であれば、現在のブリーダ抵抗器筐体を流用できるため、大幅なコスト削減が見込まれる。また、冷却効果については、100 秒の繰返し通電時でも既設ファンの風速 2m/s で十分な冷却効果があることが分かった。

3.2 加速電源インバータの改造

加速電源インバータは、イオン源のブレークダウンの際の高速スイッチとして用いられており、3 段の加速電源の系統毎に GTO (Gate Turn-Off thyristor) インバータを 3 台並列接続し、合計 9 台のインバータで出力制御している。長パルス運転に向けては、1 系統に流れる電流値を抑えるために、既存の GTO に IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor : 電子注入促進型トランジスタ) を追加する。図 5 に既設 GTO インバータ回路構成図、図 6 に IEGT を追加した回路構成図を示す。GTO スイッチを増設しない理由は、既設 GTO が既に製造中止となったためである。加速出力電圧 (-490kV) 及び加速第 1 出力(-326kV) の出力電圧を従来の 3 台から 4 台に並列数を増加させた既存の GTO インバータ系統で制御し、加速第 2 出力電圧 (-163 kV) の出力電圧を

新設する IEGT インバータで制御する。また、これら新設する IEGT を格納する建屋は、既設インバータを格納している建屋に隣接して新たに建築する。

3.3 負イオン生成部電源及び引出電源の 100 秒化改造検討

負イオン生成部電源（フィラメント電源、アーク電源、バイアス電源、PG フィルター電源）及び引出電源の 100 秒運転に向けて既設機器の熱設計、性能の再評価を行った上で、既設機器を最大限有効利用することを目的に 100 秒化改造検討を行った。各電源共に、運転時間の延長に伴う注入熱量を考慮して、抵抗器等の容量の増加により 100 秒運転を行うとして検討を行った結果、フィラメント電源以外の負イオン生成部電源と引出電源については、各電源の構成機器の一部を交換することで、100 秒運転が可能であることが分かった。フィラメント電源については、電源盤内の各構成機器の容量増加に伴い、電源盤の大型化が必要となるため、今後、高電位テーブル内の耐震強度の検討及び高電位テーブル内の電源盤のレイアウト変更の検討を行う。各電源の構成機器の改造箇所の最終的な方針は、2011 年 7 月から JT-60 発電機棟にて実施する負イオン生成部改良試験時に併せて確認する予定である。

4 まとめ

- ① 加速電源ブリーダ抵抗の長パルス限界試験を基に検討した結果、ブリーダ抵抗器の 100 秒化改造は、全体の抵抗値を高くすることにより、入力エネルギーを低減させて温度上昇を抑制させる方針とした。現在抵抗値を 2 倍にする方針で設計を進めているが、この改造の場合、高抵抗化に伴い、電圧制御の安定性の低下をどこまで許容できるかを、実運転で確認する必要がある。ブリーダ抵抗器の冷却効果については、現状のファンによる冷却能力で十分であることが分かった。
- ② 加速電源インバータについては、既存 GTO インバータと IEGT インバータの組合せにより、各スイッチ素子 1 台あたりを 3/4 の電流値に抑えることで 100 秒運転が可能である。また、新設 IEGT インバータを格納する建屋は、既設インバータを格納している建屋に隣接して新たに建築する。
- ③ 負イオン生成部電源については、フィラメント電源を除いて各電源の一部の構成機器を交換することで、100 秒運転が可能であることが分かった。フィラメント電源は、電源盤の大型化が想定されるため、今後更に高電位テーブルの耐震強度の検討及び高電位テーブル内の電源盤のレイアウトの検討を行う予定である。また、2011 年 7 月から JT-60 発電機棟にて実施する予定の負イオン生成部改良試験工程に合

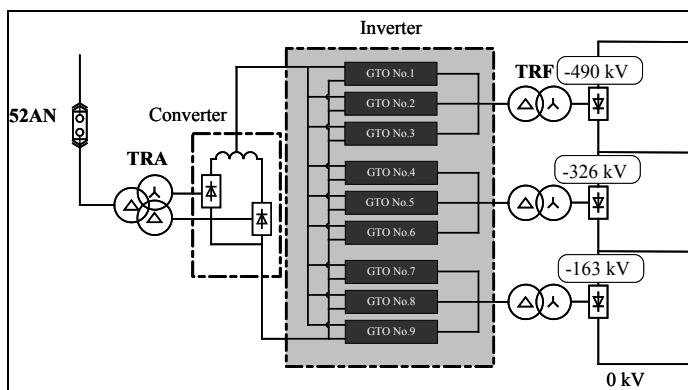


図 5. 既設 GTO インバータ回路構成

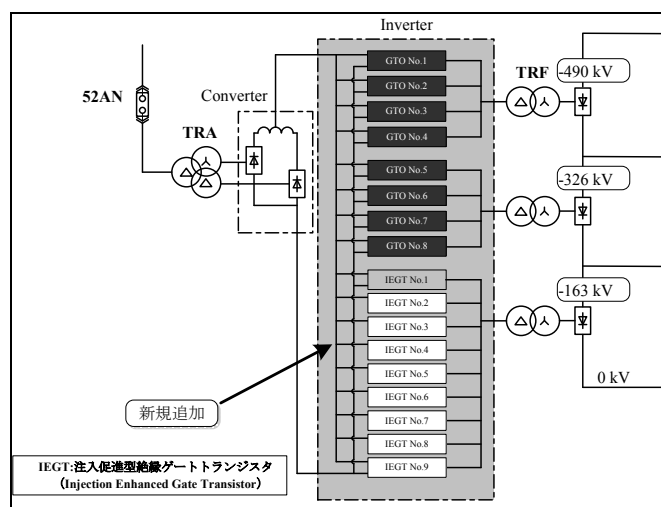


図 6. IEGT を追加した回路構成

わせ、試験で必要となる各電源の改造を順次進める計画である。また、この試験運転中に、改造箇所及び改造の必要性についてボーターライン上の盤内機器について温度監視を行い、長パルス運転を実施する上での更なる問題点の確認及び改造箇所の健全性確認を行う予定である。